

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Gold**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Mísení RGB a bílých LED pro dosažení špičkových parametrů**  
**Mixing RGB and white LEDs for best parameters achievement.**

Zásady pro vypracování:

1. Kolorimetrie ve vztahu k LED a jejich mísení
2. Parametry LED a jejich změny s teplotou a stmíváním
3. Sestavení říditelného zdroje pro LED
4. Výběr LED, výroba měřicího přípravku
5. Rozbor výsledků měření

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] JIŘÍ, Habel. Světelná technika. Praha: České vysoké učení technické, 1990. 75 s. ISBN 80-01-00407-4.  
[2] MÁCHA, Marek. Miešanie LED svetelných zdrojov ako nástroj pre zvyšovanie Ra. Světlo. 2011, 5, s. 62-63. ISSN 1212-0812.  
[3] SCHUBERT, E. F.: Light-emitting diodes. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 432 s. Dostupný z WWW: <[http://books.google.com/books?id=0H4bWIpaXb0C&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com/books?id=0H4bWIpaXb0C&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)>. ISBN 0-521-86538-8.

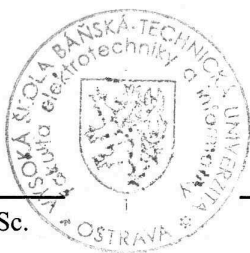
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
*vedoucí katedry*



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky 410**

**Mísení RGB a bílých LED pro dosažení špičkových parametrů**

**Mixing RGB and white LEDs for best parameters achievement.**

**Prohlášení:**

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

**Poděkování:**

*Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své Diplomové práce panu prof. Ing. Karlu Sokanskému, CSc a panu Ing Zbyňkovi Carbolovi za odborné konzultace metodické rady a vstřícný přístup.*

**Odevzdání: 4. 5. 2012**

---

Pavel Gold

## ***Anotace***

Cílem této diplomové práce „Mísení RGB a bílých LED pro dosažení špičkových parametrů“ bylo v prvních dvou kapitolách popsat vjemový orgán, vnímání barev a základní vlastnosti LED, jakožto získávání bílého světla, spektrální charakteristiky a stmívání LED různými metodami. Hlavním bodem této práce bylo sestavit proudový řiditelný zdroj pro nezávislé ovládání až čtyř LED. Ten je využit pro měření LED světelných zdrojů v kulovém integrátoru. Praktickým měřením barevných a bílých LED bylo ověřeno jejich chování při mísení a stmívání. Měření na zhotoveném zdroji poslouží studentům jako názorná ukázka změn indexu podání barev, teploty chromatičnosti a dalších parametrů LED při jejich stmívání.

## ***Abstrakt***

The aim of this thesis „Mixing RGB and white LEDs for best parameters achievement“ in the first two chapters was to describe the perceptual body, color perception and basic properties of LEDs, as yielding a white light, and spectral characteristics of LED dimming by different methods. The main point of this work was to build a controllable current source for independent control of up to four LEDs. It is used to measure the LED light sources in a spherical integrator. A practical measurement of color and white LED behavior was verified in mixing and dimming.

Measurements made at the source will help students with a demonstration of changes in color rendering index of temperature and other parameters chromaticity of LEDs in their dimming.

## ***Klíčová slova***

kolorimetrický trojúhelník, výkonová LED, index podání barev, teplota chromatičnosti, stmívání LED, regulace proudu, kulový integrátor, spektrofotometrie, míchání barev RGB

## ***Key words***

Colorimetric triangle, power LED, index of rendering color, temperature of chromaticity, dimming LED, current control, spherical integrator, spectrophotometry, RGB color mixing

## Seznam použitých symbolů

|                        |  |
|------------------------|--|
| $\lambda$              | vlnová délka (nm)  |
| $f$                    | frekvence (Hz)   |
| $c_0$                  | rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu ( $2,998 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
| $E$                    | osvětlenost (lx)   |
| $K$                    | kontrast jasů (-)  |
| $L$                    | jas ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )  |
| $L_a$                  | jas pozorovaného detailu ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )   |
| $L_b$                  | jas okolí ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )  |
| $\Delta L_{\min}$      | nejmenší rozlišitelný jas ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )  |
| $\phi_{e\lambda}$      | poměrná spektrální hustota ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ )  |
| $T_c$                  | teplota chromatičnosti   |
| $R_a$                  | index podání barev   |
| $\eta_{\text{ext}}$    | externí kvantová účinnost konvertoru   |
| $P_0$                  | elektrický příkon (W)  |
| $P_1$                  | zřakový výstupní výkon, modrá oblast spektra   |
| $P_2$                  | zřakový výstupní výkon, žlutá oblast spektra   |
| $T$                    | perioda (s)  |
| $D$                    | střída   |
| $\tau$                 | doba trvání pulzu (s)  |
| $I_{\text{AVG}}$       | aktuální proud (A)   |
| $I_{\text{PEAK}}$      | maximální proud (A)  |
| $R$                    | tepelný odpor ( $1^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ )  |
| $R_Z$                  | odpor zátěže ( $\Omega$ )  |
| $R_0$                  | předřadný odpor ( $\Omega$ )   |
| $U_S$                  | minimální napětí (V)   |
| $U_{\text{STAB}}$      | napětí stabilizátoru (V)   |
| $U_d$                  | napětí diody (V)   |
| $R_P$                  | odpor potenciometru ( $\Omega$ )   |
| $\eta$                 | měrný výkon ( $\text{lm/W}$ )  |
| $R_2$                  | odpor bočníku ( $\Omega$ )   |
| $R_1$                  | zátěžný odpor ( $\Omega$ )   |
| $\Phi$                 | světelný tok (lm)  |
| $\Phi_Z$               | $\Phi$ měřeného zdroje (lm)  |
| $\rho$                 | integrační činitel odrazu  |
| $D$                    | průměr (cm)  |
| $k_i$                  | konstanta integračního fotometru   |
| $\lambda_{\text{dom}}$ | dominantní vlnová délka (nm)   |
| $T$                    | teplota ( $^\circ\text{C}$ )   |
| $I_F$                  | proud v propustném směru (A)   |

## Seznam použitých zkratk

|   |  |
|---|--|
| CCT   | teplota chromatičnosti                           |
| CRI   | index podání barev                               |
| RGBW  | Red Green Blue White (červená zelená modrá bílá) |
| $\check{\lambda}$ , $z\lambda$ , $m\lambda$ | kolorimetrické koeficienty                       |
| CIE   | mezinárodní komise pro osvětlování               |
| CIELAB                                      | barevný prostor CIE $L^*a^*b^*$                  |
| EN  | evropská norma                                   |
| C1  | clona 1  |
| C2  | clona 2  |
| PWM   | puzně šířková modulace                           |
| PN  | Positive-Negative                                |
| AlGaInP                                     | hliník gallium indium fosid                      |
| AlGaInN                                     | hliník gallium indium nitrid                     |
| GaN/GaN                                     | gallium indium nitrid/gallium nitrid             |
| LED   | Light Emitting Diode (světelná dioda)            |
| K   | korekční zdroj                                   |
| Z   | měřený zdroj                                     |
| VŠB   | Vysoká škola báňská                              |

# Obsah

|   |    |
|---|----|
| Úvod .....  | 1  |
| Kolorimetrie ve vztahu k LED a jejich mísení .....                              | 2  |
| 1.1.    Záření .....  | 2  |
| 1.2.    Vjemový orgán světelného záření, oko .....                              | 4  |
| 1.2.1.    Citlivost zraku na spektrum vlnových délek .....                      | 6  |
| 1.2.2.    Barevné vidění .....  | 7  |
| 1.2.3.    Oslnění .....   | 7  |
| 1.2.4.    Zraková pohoda .....  | 7  |
| 1.2.5.    Vady oka .....  | 8  |
| 1.3.    Vnímání barev .....   | 8  |
| 1.4.    Nauka o barvě .....   | 10 |
| 1.4.1.    Spektrální charakteristika .....                                      | 11 |
| 1.4.2.    Barevná čistota světla .....  | 12 |
| 1.4.3.    Teplota chromatičnosti .....  | 13 |
| 1.4.4.    Munsellův atlas barev .....   | 13 |
| 1.4.5.    Podání barev .....  | 13 |
| 1.5.    LED diody a podání barev .....  | 14 |
| 2.    Parametry LED a jejich změny s teplotou a stmíváním .....                 | 15 |
| 2.1.    Základní princip LED .....  | 16 |
| 2.1.1.    Získávání bílého světla .....   | 16 |
| 2.1.2.    Komplementární vlnové délky .....                                     | 17 |
| 2.1.3.    Konvertor vlnových délek .....  | 17 |
| 2.1.4.    Pro vytváření bílého světla se dále používá konvertor UV záření ..... | 19 |
| 2.2.    Stmívání LED .....  | 22 |
| 2.2.1.    Způsoby stmívání LED .....  | 22 |
| 2.2.2.    Posun barevnosti LED při stmívání .....                               | 23 |
| 2.2.3.    Posun trichromatických souřadnic bílé LED .....                       | 24 |
| 2.2.4.    Změna barevnosti RGB LED řízených změnou proudu a pomocí PWM .....    | 25 |
| 2.3.    Teplotní závislost LED .....  | 26 |
| 3.    Sestavení říditelného zdroje pro LED .....                                | 29 |
| 3.1.    Teorie zdroje proudu se stabilizátory napětí .....                      | 29 |
| 3.1.1.    Proudový zdroj s třípinovým stabilizátorem napětí .....               | 29 |
| 3.1.2.    Regulovatelný zdroj proudu pro napájení LED .....                     | 31 |
| 3.2.    Návrh plošného spoje .....  | 31 |
| 3.3.    Digitální teploměr .....  | 32 |
| 3.4.    Měření vstupních parametrů LED .....                                    | 33 |
| 3.5.    Složení říditelného čtyřkanálového zdroje proudu .....                  | 35 |
| 3.6.    Upevňování LED .....  | 36 |
| 4.    Výběr LED, výroba měřicího přípravku .....                                | 37 |
| 4.1.    Kulový integrátor .....   | 37 |
| 4.2.    Způsob měření osvětlenosti v kulovém integrátoru .....                  | 38 |
| 4.3.    Výběr LED .....   | 40 |
| 4.3.1.    Světelný tok LED .....  | 41 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 5.     | Rozbor výsledků měření.....                         | 44 |
| 5.1.   | Měření fotometrických veličin.....                  | 45 |
| 5.2.   | Měření základních parametrů LED.....                | 45 |
| 5.2.1. | Měření závislosti toku $\Phi$ na proudu $I_F$ ..... | 46 |
| 5.3.   | Vyhodnocení.....                                    | 49 |
| 5.4.   | Mísení RGB a bílých LED.....                        | 50 |
| 5.4.1. | Simulace v programu LighTools .....                 | 50 |
| 5.4.2. | Vyhodnocení získávání bílého světla .....           | 52 |
|        | Závěr.....  | 54 |
|        | Seznam použité literatury .....                     | 56 |
|        | Seznam příloh.....                                  | 58 |

## Úvod

Tato práce je zaměřena problematiku LED, převážně na získávání bílého světla pomocí RGB LED a bílé LED s barevnými. V dnešní době se LED běžně používají pro osvětlování jak vnitřních tak venkovních prostor. Je velký zájem tyto zdroje stmívat a měnit jejich parametry. Pokud se tímto problémem chceme zabývat, je nutné blíže pochopit princip a chování LED.

Cílem této práce je seznámit se s problematikou stmívání LED, převážně se změnou jejich parametrů a hlavně, názorně si ukázat možnosti získávání bílého světla, změny teploty chromatičnosti, indexu podání barev a dalších parametrů při rozličných způsobech mísení bílého světla.

Nezbytnou součástí této diplomové práce bude návrh a vyhotovení proudového zdroje. Tento zdroj by měl být schopen nezávisle na sobě stmívat čtyři LED a měřit jejich napětí, proud a teplotu.

Pro tuto práci budou vybrány LED od společnosti Cree. Budou použity pro měření v kulovém integrátoru (40 cm) a budou napájeny pomocí zhotoveného proudového zdroje.



# Kolorimetrie ve vztahu k LED a jejich mísení

## 1.1. Záření

Jedná se o přenos nebo vysílání energie ve formě elektromagnetických vln nebo hmotných částic, které nazýváme fotony. Záření lze rozložit na více složek se sinusovým průběhem. Jednotlivé složky mají charakteristickou jednu frekvenci  $f$  v (Hz), nebo také vlnovou délku  $\lambda$  (nm). Spektrum záření získáme poskládáním jednotlivých složek záření podle jejich frekvence nebo vlnových délek. Záření jediné frekvence se nazývá monofrekvenční, ve viditelné oblasti spektra budí zcela určitý barevný počitek a z tohoto důvodu označujeme toto záření za monochromatické.

Viditelné spektrum záření se nachází v rozmezí vlnových délek 380 nm až 780 nm. Jde o záření, které je schopné jakýmkoliv způsobem vyvolat zrakový vjem, viz Obr. 1.1 (vizuální počitek). Přesné mezní hodnoty viditelného spektra nelze stanovit, závisí na množství zářivého toku a spektrální citlivosti oka pozorovatele. Viditelné spektrum záření sousedí na straně kratších vlnových délek s ultrafialovým zářením a na straně delších vlnových délek s infračerveným zářením.

Vlnová délka  $\lambda$  je závislá na rychlosti šíření záření. Ve vakuu se vlnová délka záření určuje ze vztahu

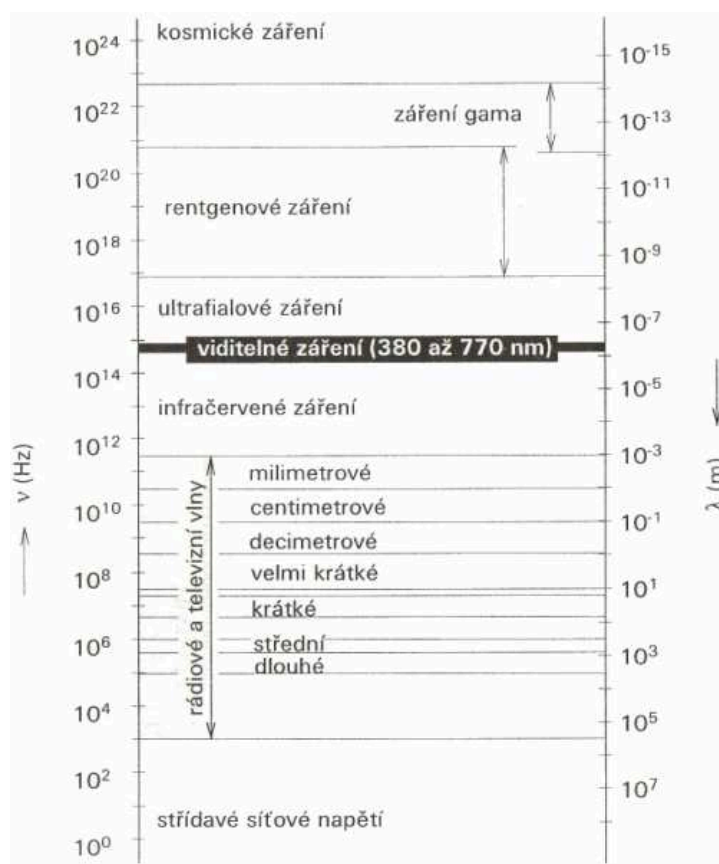
$$\lambda = c_0 \cdot f^{-1} \quad (\text{nm; m}\cdot\text{s}^{-1}, \text{Hz}) \quad (1.1)$$

kde  $c_0$  je rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu ( $2,998 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Vlnovou délku udáváme v jednotkách délky, nejčastěji v (nm) ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ).

Přírozeným zdrojem elektromagnetického záření je Slunce. Jeho záření dopadající na zemský povrch je jedním z nejdůležitějších vlivů pro život na zemi. Postupem času a vývoje lidstva již nejsme tak často v přímém kontaktu se sluncem, většinu času trávíme krytých prostorách. Pro zdraví člověka je důležitá kvalita tohoto prostředí, jedním z faktorů pro udržení dobrého zdraví a pohody je i nemalou částí přispívající umělé osvětlení.

V závislosti na druhu energie a látky dodávané do zdrojů světla se tato energie mění na světelnou pomocí těchto tří základních principů:

- inkandescencí – tepelné buzení vznikající při zahřátí pevné látky na vysokou teplotu vybuzením atomů v elektrickém výboji
- luminiscencí pevných látek
- emisí fotonů při průchodu elektronů PN přechodem.



Obr. 1.1 – rozdělení vlnových délek [1.1]

Inkandescenci využívají převážně halogenové žárovky. Elektrická energie se mění průchodem tenkým wolframovým vláknem na energii tepelnou. Do druhé skupiny patří všechny výbojky vysokotlaké, nízkotlaké, rtuťové, sodíkové, halogenidové a zářivkové zdroje. Třetí skupina jsou zdroje, které vyzařují záření o kratších vlnových délkách (ultrafialové) a přeměňují jej na záření o delší vlnové délce. Tento způsob se využívá především u zářivek, kde je povrch trubice pokryt luminoforem, který převede ultrafialové záření o vlnové délce  $\lambda = 2,53 \cdot 10^{-7}$  nm do vlnových délek viditelného spektra. Bez této povrchové úpravy by zářivka vyzařovala mnohem méně světla.

Výboj vzniká hořením oblouku v plynném prostředí. Druhy výbojů jsou závislé na použitém plynu, jeho tlaku a dalších parametrech. Pro použití v osvětlovací technice se používají dva druhy obloukového výboje. Nízkotlaké, ty jsou využívány v zářivkových svítidlech, a vysokotlaké, např. sodíková vysokotlaká výbojka.

Luminiscence je děj, kdy se uvolňují kvanta optického záření (fotony) z molekul, atomů nebo krystalů látek. Fotony se uvolní tehdy, pokud je energie absorbována, čímž se atom, molekula nebo krystal dostanou do tzv. vybuzeného stavu. Tento proces se děje třemi způsoby:

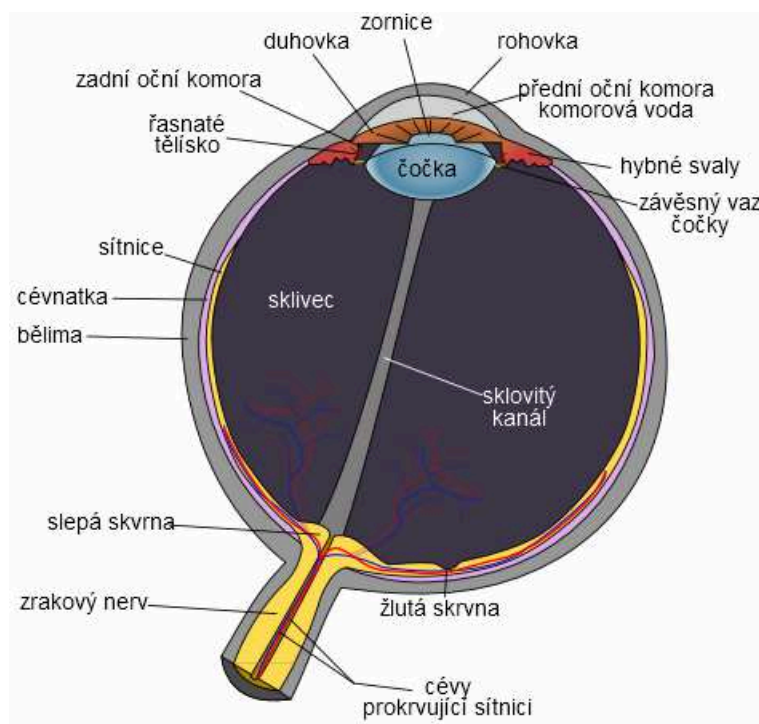
- fotoluminiscencí
- elektroluminiscencí
- radioluminiscencí

[1]

## 1.2. Vjemový orgán světelného záření, oko

Zrakový systém je velmi složitá biologická soustava s komplikovanou anatomicou strukturou. Pro správné posuzování kvality osvětlení je nutno znát základy anatomie a fyziologie zrakového systému. Vidění je proces přenosu a zpracování informace přijaté v podobě světelného podnětu zrakovým biologickým systémem. Zrak pro člověka slouží jako zařízení pro příjem a zpracování informací o prostředí kolem sebe, rozlišení kontrastů, jasů, barev, tvarů, a na základě toho dochází k identifikaci a analýze. Světlo, jež je nositelem těchto informací, vytváří světelný podnět. Příjem informací je tedy závislý na osvětlení, které může proces zjednodušit nebo naopak znesnadnit. [1]

Oko je smyslový orgán, ve kterém je obsaženo optické zařízení a přijímací zařízení nazývané sítnice, kdy optický aparát vytvoří na sítnici převrácený, souměrný a neskutečný obraz. Optický systém je znázorněn na Obr. 1.2. Na sítnici se nacházejí fotoreceptory, čípky a tyčinky. Čípky slouží pro denní vidění (fotopické), je jich asi 6,5 milionu a jsou soustředěny blíže ke středu sítnice. Tyčinky, které slouží pro noční (skotopické) vidění jsou rozmístěny více v okrajových částech sítnice a je jich podstatně více, asi okolo 125 milionů. Dále pak obsahuje velmi složitý systém nervových buněk (neuronů) a nervových (reléových) spojů, které obraz zachytí a vytrídí nepotřebné informace. Naopak důležité informace se zpřesní a ve formě nervových podráždění putují dále k mozku.



Obr. 1.2 - Optický systém

Množství informací přenesených zrakovým orgánem lze nazvat informační výkon. Jeho velikost stoupá s větší intenzitou osvětlenosti a tím i jasy pozorovaných objektů. Toto však funguje jen do určité míry osvětlenosti, ta je dána přenosovou kapacitou informačního kanálu. Pro navrhování venkovního a umělého osvětlení je nutno vědět, že největší podíl na velikosti informačního výkonu mají relativně nízké osvětlenosti (50 lx) oproti zvyšování osvětlenosti v poměrně vysoké oblasti 500 lx.

Protože okolí kolem nás není konstantní z hlediska osvětlenosti, jasů a barev, je nutné, aby se jim oko bylo schopno přizpůsobit. [1]

**Akomodace** je samovolné přizpůsobení se oka vzdálenosti pozorovaného předmětu. Oko dosahuje akomodací zaostření obrazu na sítnici. Akomodace je aktivní proces dosahovaný nervovou činností, při které se mění zakřivení čočky oka. Nejbližší bod, který může plně akomodované oko vidět ostře, se nazývá blízký bod. Tento bod se s přibývajícím věkem vzdaluje, a to od 10 cm u dětí až po 50 cm u padesátileté osoby. [2]

**Adaptace** je přizpůsobení se oka různým hladinám osvětlenosti. Oko je schopné vnímat při osvětlenostech od hodnot 0,25 lx až do  $10^5$  lx. Adaptace je dvojí. Adaptace na tmou trvá až 40 minut. Adaptace na světlo trvá 5 až 7 minut. Optický systém oka je charakterizován ostroty zobrazení v úrovni sítnice. [2]

**Rychlost vnímání** se dá chápat jako převrácená hodnota času, který uplynul od doby vzniku světelného podnětu do uvědomění si této změny. Rychlost vnímání závisí především na jasu, kdy při malých hodnotách jasu může trvat uvědomění i 1 s. Čas se snižuje při stoupajícím jasu až do 300 cd.m<sup>2</sup>. [2]

**Setrvačnost zrakového vjemu** je vlastnost oka udržet zrakový vjem ještě nějaký čas po odeznění světelného podnětu, např. blesk trvajících několik (μs) vyvolá zrakový vjem trvajících 0,3 s. Dochází-li ke změnám síly světelných podnětů s větší frekvencí než je frekvence splývání, oko to vnímá jako jeden nepřerušovaný světelný podnět, který má svou velikost rovnu aritmetickému průměru intenzit přerušovaných podnětů. [2]

**Zorné pole** je část prostoru, kterou lze spatřit bez pohybu hlavy nebo oka. Pro přesné vidění se nastaví optické osy obou očí do jednoho bodu, toto zajišťuje přesná souhra očních svalů. Velikost zorného pole se zmenšuje se zmenšujícími se jasy a závisí také na chromatičnosti daného světla. Zorné pole je největší pro žlutou a modrou barvu, menší pro červenou a nejmenší pro zelenou barvu. Kritický detail je část zorného pole, kterou si oko samo umísťuje do centra zorného pole, tento jedno nebo vícerozměrný útvar se používá při posouzení zrakové obtížnosti prováděné práce. Pro přímé rozlišení kritického detailu je rozhodující jas jeho okolí. Bezprostřední okolí a kritický detail tvoří pozorovaný předmět. Dále mezi 20° a 60 ° stupni vrcholového úhlu se nachází pozadí, nad 60° stupňů je v zorném poli vzdálené pozadí. Tato okrajová část nemá velký vliv na rozlišení kritického detailu. [2]

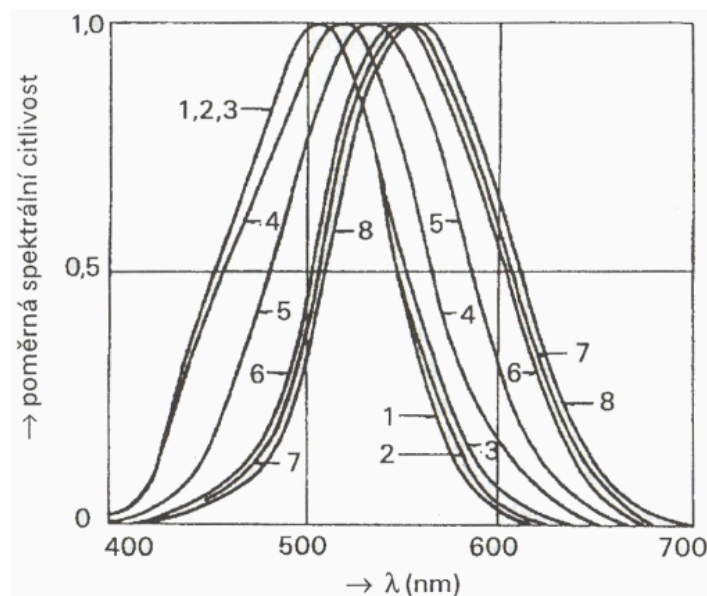
**Rozlišovací schopnost** je schopnost zrakového orgánu rozeznat rozdílné světelné podněty vycházející z různých částí zorného pole. Aby bylo možné rozlišit pozorované předměty, je zapotřebí dostatečného rozdílu jasů a barev. U trojrozměrných předmětů musí být pro vhodné doplnění struktury a prostorového uspořádání předmětů vhodné stínování. Kontrast jasů lze charakterizovat rozdílem jasu pozorovaného detailu  $L_a$  a jeho okolí  $L_b$ . [2]

$$K = \frac{|L_a - L_b|}{L_b} \quad (-; \text{cd.m}^{-2}, \text{cd.m}^{-2}) \quad (1.2)$$

Je tedy zřejmé, že při zvyšování kontrastu  $K$  se zvětšuje pravděpodobnost zpozorování detailu. Prahový kontrast  $K_{\min}$  odpovídá prahu rozlišitelnosti jasu  $|L_a - L_b|_{\min} = \Delta L_{\min}$ . Jedná se o nejmenší rozlišitelný rozdíl jasu. Převrácenou hodnotou prahového kontrastu je kontrastní citlivost, která dosahuje optimálních hodnot při jasech od  $300 \text{ cd.m}^{-2}$  až do  $5000 \text{ cd.m}^{-2}$ . U vyšších jasů dochází k oslnění, čím kontrastní citlivost opět klesá. Chceme-li rozeznat dvě plochy s rozdílným jasnem, je důležitá hladina adaptačního jasu. Oko je schopno rozlišit při malém adaptačním jasu dvou ploch pouze kontrasty s poměrem 1:3. Naopak při velkých jasech řádově desetitisíců lze rozeznat kontrasty mnohem menší a to 1:1,01. Z toho vyplývá, že pro rozlišování malých kontrastů je důležitá vysoká hladina jasu v celém zorném poli. Pro celodenní pracovní činnost však není vhodný prostor s monotónními jasy. Dochází tímto k útlumu a únavě člověka. Proto je vhodné adaptační jasy střídat pro lepší stimulaci. Dále pod rozlišovací schopnost patří také zraková ostrost, touto veličinou se posuzuje schopnost oka rozeznat dva detaily blízko sebe vůči určenému pozadí. Detail si můžeme představit například jako čáru, bod, nebo malou plochu. Zdravé oko s normální ostrostí dokáže rozeznat dva předměty, které jsou vidět pod úhlem  $1^\circ$ . Zraková ostrost má také velkou závislost na podmínkách osvětlení, především na adaptačním jasu pozadí. Při jeho zvyšování zraková ostrost stoupá. [2]

### 1.2.1. Citlivost zraku na spektrum vlnových délek

Oko nevnímá všechny vyzařované vlnové délky stejně. Na obrázku je znázorněn průběh viditelnosti vlnových délek při různých hladinách jasu. Citlivost oka určují různé citlivosti čípků (fotopické vidění), jež jsou u každého člověka jiné. Největší citlivost se pohybuje při fotopickém vidění okolo  $555 \text{ nm}$  (křivka 8). Při vidění skotopickém se zapojují do vidění tyčinky, které jsou citlivější na vyzařování v kratších vlnových délkách, asi okolo  $507 \text{ nm}$  (křivka 1). Je tedy patrné, že při přechodu z fotopického na skotopické vidění dochází ke snižování jasnosti červených ploch a naopak vzrůstá jas ploch modrých. Tato změna se nazývá Purkyňův jev.



Obr. 1.3 - Křivky poměrné spektrální citlivosti zraku k záření různých vlnových délek pro různé adaptační jasy  $L_a$

1 -  $L_a = 10^{-5} \text{ cd.m}^{-2}$  (skotopické vidění), 2 -  $L_a = 10^{-4}$ , ... , 6 -  $L_a = 1 \text{ cd.m}^{-2}$ , ... , 8 -  $L_a = 100 \text{ cd.m}^{-2}$  (fotopické vidění) [1]

### 1.2.2. Barevné vidění

Pomáhá rozpoznávat barevné předměty v prostoru a rozšiřuje tím identifikační schopnosti člověka. Jde o vnímání a rozlišování pestrých barev. Funkce barevného vidění se dá popsat tak, že v oku na sítnici jsou tři druhy fotoreceptorů různě citlivých na různé vlnové délky. Jeden druh fotoreceptorů je citlivý na červenou, druhý na modrou a třetí na zelenou barvu. Ostatní barvy se získávají mícháním těchto tří základních barev v různém poměru. [1]

### 1.2.3. Oslnění

Nastává při velkých jasech v zorném poli pozorovatele nebo při jejich velkých rozdílech. Dále pak, dojde-li k velkým prostorovým nebo časovým kontrastům jasu, které překračují schopnost adaptability zraku. Jedná se o nepříznivý stav, který vzniká vystavením sítnice oka vyšším jasům, než na které byl zrak adaptován. Oslnění lze rozlišit podle příčiny vzniku na oslnění přímé, způsobené nadměrným jasným světlem nebo světelně činným okolím, oslnění odrazem vznikajícím odrazem jasu od lesklých částí pozorovaných předmětů. Oslnění přechodové nastává při náhle změně adaptačního jasu nebo při přechodu z tmavého do světlého prostředí. Oslnění závoje nastává při situaci, kdy jas ploch před pozorovaným objektem je větší než jas pozorovaného pozadí. Jako příklad lze uvést pozorování přes osvětlenou záclonu.

Zvlášť důležité je oslnění kontrastem (relativní oslnění), vznikající při výskytu velmi vysokých jasů v zorném poli, na které není oko adaptováno. Toto oslnění lze z hlediska psychofyziologických následků rozdělit na:

oslnění psychologické - pozorovatelné  
- rušivé

oslnění fyziologické - omezující  
- oslepující.

Oslepující a omezující oslnění by se nemělo v osvětlovacích soustavách vůbec vyskytovat, stejně tak i rušivé oslnění, zvláště v pracovních prostorách. Citlivost oka na oslnění je největší ve směru pohledové osy s okolím do  $14^\circ$ . Vliv jasů se vzdáleností od osy pohledu se zmenšuje, do  $27^\circ$  je stále znatelný. Při větších úhlech je jejich vliv z fyziologického hlediska minimální. [1]

### 1.2.4. Zraková pohoda

Protože práce zraku velmi úzce souvisí s centrální nervovou soustavou, mají na zrakové vnímání podstatný vliv i různé rušivé či uklidňující momenty a vlivy obklopujícího prostředí. Např. vzrušení,

hněv, nepořádek, chlad, zvýšená teplota, hluk, přílišné pracovní vypětí, na druhé straně dobrá nálada, radost, příjemné prostředí, klid, pocit z dobře vykonané práce apod. Je proto vždy důležité vytvořit vhodné prostředí podle druhu činnosti a předpokládaného účelu, tzv. mikroklima. Světelné mikroklima je vytvářeno geometrickými rozměry prostoru, typem světelných zdrojů, druhem a rozmístěním svítidel, hladinami osvětlenosti a jejich rovnoměrností v různých rovinách, tedy rozložením jasu v prostoru, dále rozmístěním potřebného zařízení, barevnou úpravou prostoru a veškerého vybavení a konečně i barevným podáním a plastickým vzhledem všech předmětů a lidí v prostoru. [1]

### 1.2.5. Vady oka

Oko bez vady, správně zobrazující (ametropické) při klidové akomodaci sbíhá paprsky dopadající na rohovku do jednoho bodu na sítnici. Pokud se tyto paprsky sbíhají před sítnicí, jedná se o krátkozrakost (myopické oko). Lze ji kompenzovat použitím rozptylných čoček v brýlích. Jestliže se paprsky procházející rohovkou sbíhají do jednoho bodu až za sítnicí, jedná se o dalekozrakost (hypermetrické oko). Náprava tohoto oka se provádí sférickými čočkami spojnými. Jedná se o refrakční vady oka (ametropii). Dále pak vznikají u opticky normálního oka odchylky (aberrace), sférická, chromatická chyba, fyziologický astigmatismus a šedý zákal (katarakta). Při této poruše ztrácí čočka svou průzračnost a dochází k zhoršování vidění. V této práci není třeba si jimi dále zabývat. [1]

## 1.3. Vnímání barev

Předmětem nauky o barvě je správné určení barvy světla vyzařovaného různými zdroji a také správné vyhodnocení barvy pozorovaných předmětů. Jde o velmi složitý úkol už z toho důvodu, že ne každý člověk vnímá jeden barevný vjem stejně, a proto bylo zapotřebí si stanovit jednotné mezinárodní soustavy.

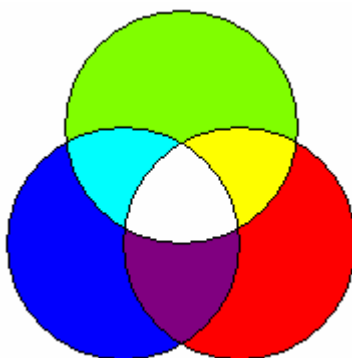
Vjem barvy určuje vlastnost zraťového počítku. Díky této vlastnosti je pozorovatel schopen rozlišit dvě pozorované plochy, které mají stejný tvar, velikost, strukturu a jsou ve stejné poloze vůči pozorovateli. Pojem barva se používá i v popisování vlastností světla a předmětů. Pro přesnější určení se používá pro určení barvy světla pojem chromatičnost a barevné vlastnosti předmětů se nazývají kolorita. Chromatičnost popisuje spektrum záření primárního zdroje světla. Kolorite je dána spektrálním složením světla zdroje ozařující sledovanou plochu a spektrem nebo propustností materiálu předmětu. Je tedy patrné, že kolorita je závislá na chromatičnosti. Důležitým poznatkem je fakt, že tyto vlastnosti jsme schopni jednoznačně určit fyzikálně podle spektrálního složení barevného podnětu a spektrální citlivosti zraku k záření různých vlnových délek. Světelné záření je složeno z více monofrekvenčních složek, kterým je přiřazen zcela určitý barevný počitek. Oko toto složení světla z různých monofrekvenčních složek není schopno rozložit, vnímá záření aditivně a odezvy na tyto složky spojí v zraťový vjem barvy. Barvy, které vnímáme, nazýváme barevný tón, ten se vyjadřuje názvy barev fialová, modrá, zelená. Barevný tón je kvalitativní rozdíl mezi spektrálními barvami. Pro lepší orientaci je vhodné uvést přibližné oblasti vlnových délek spektrálních barev X.

Tab. 1.1 - Vlnová délka spektrálních barev [7]

| Rozmezí vlnových délek | Barevný tón spektrální barvy |
|------------------------|------------------------------|
| 380 - 430              | Fialová                      |
| 430 - 465              | Modrofialová                 |
| 465 - 490              | Modrá                        |
| 490 - 500              | Modrozelená                  |
| 500 - 560              | Zelená                       |
| 560 - 575              | Zelenožlutá                  |
| 575 - 585              | Žlutá                        |
| 585 - 620              | Oranžová                     |
| 620 - 770              | Červená                      |

Dále existují takzvané nespektrální barvy, patří k nim barvy purpurové. Tyto barvy nejsou součástí žádného spektra světla, jako je slunce a jiné světelné zdroje. Jejich vznik je zapříčiněn míšením krajních částí viditelného spektra, což jsou spektrální barvy fialová a červená. Dále se barvy dělí na pestré a nepestré, kdy barva pestrá udává takový vjem barvy, který má barevný tón.

Vezmeme-li spektrum slunečního záření, což je v podstatě bílé světlo a odstraníme z něj oblast odpovídající modrému barevnému tónu, zbylé záření vzbudí vjem barvy, jejíž barevný tón bude žlutý. Takto lze odstranit zelenou barvu a dostaneme ze zbytku slunečního spektra záření s barevným tónem purpurovým. Dále lze při odebrání červené části získat ze zbytku záření lazurový barevný tón. Viditelné spektrum je možné rozložit na tři základní části, kdy jednotlivé části tvoří tyto tři barvy: modrá, zelená a červená viz. Obr 1.4.



Obr. 1.4 - Rozložení bílého světla

Bílé světlo lze také tvořit míšením základní barvy se světlem ze zbývajících částí spektra. Vhodným poměrem smíchání dvou barev získáme bílé nepestré světlo. Tyto barvy se nazývají komplementární (doplňkové) barvy. Z tohoto vyplývá, že lze bílé světlo tvořit jednak jako směs všech spektrálních světél a také lze vytvořit pouze dvěma vhodně zvolenými světly. Bílé světlo vytváří pořád stejný vjem, bez ohledu na to, z jakého je zdroje.

V dnešní době se již ve velké míře dbá na světelnou hygienu a stimulační schopnost osvětlení v kancelářích, pracovnách a místech, kde podíl umělého osvětlení hraje velkou roli. Proto se barvy dělí podle psychologického působení na teplé a studené. Teplé barvy jsou např. červená, oranžová,



žlutá, a studené barvy jsou modrá, zelená, fialová, modrozelená. Pro představu působení na člověka těchto dvou druhů barev je sestavena tabulka 1.2. [1] [2] [7]

Tab. 1.2 - Vlivy teplé a studené barvy na člověka

| Vliv na                     | Účinek barvy       |                        |
|-----------------------------|--------------------|------------------------|
|                             | oranžová           | Modrozelená            |
| fyzickou aktivitu           | tlumící (pasivní)  | povzbuzující (aktivní) |
| jasově-optický dojem        | světlý vystupující | temný odstupující      |
| citový (psychologický) doje | teplý              | Studený                |
| (psychologický) dojem       | suchý              | Vlažný                 |
|                             | zdůrazňující       | Uklidňující            |
|                             | aktivní            | Pasivní                |
|                             | dráždivý           |                        |

## 1.4. Nauka o barvě

K přesnému popisu barev se užívá kolorimetrické soustavy. Ta charakterizuje barvu třemi údaji, převážně čísly. Z tohoto důvodu se kolorimetrickým soustavám také říká trichromatické soustavy. Princip charakterizování barev podle trichromatické soustavy je takový, že pro jakýkoliv barevný podnět je možné nahradit adiční směsí tří vhodně zvolených měrných barevných podnětů. Obecné označení tří měrných barevných podnětů je např.  $X^0$ ,  $Y^0$ ,  $Z^0$ , nebo  $\check{C}^0$ ,  $Z^0$ ,  $M^0$ . Tyto tři podněty jsou libovolně zvoleny a jsou lineárně nezávislé. V mezinárodní kolorimetrické soustavě, kde se používá označení (X, Y, Z), se uvažují měrná světla nerealizovatelná, a to z toho důvodu, že všechny reálné barvy a jejich trichromatické souřadnice vycházejí jako kladné. Hodnoty těchto kolorimetrických koeficientů se považují za základ určující soustavu XYZ. Tyto hodnoty platí pro normálního fotometrického pozorovatele a využívají se při pozorování do 4° zorného úhlu.

Pokud pozorujeme plochy zobrazující se pod úhlem větším než 4° (pozorování povrchových barev), použijeme pro výpočet kolorimetrické koeficienty  $x_{(10)}(\lambda)$ ,  $y_{(10)}(\lambda)$ ,  $z_{(10)}(\lambda)$  (doplňkové kolorimetrické pozorovatele). Pro správnou funkci soustavy byla měrná světla XYZ stanovena takovým způsobem, aby se spektrální citlivost  $V(\lambda)$  normálního fotometrického pozorovatele shodovala s hodnotami trichromatického činitele  $x_{(10)}(\lambda)$ . Z tohoto důvodu je tedy složka Y v trichromatické soustavě XYZ úměrná světelnému toku nebo jasu daného barevného podnětu. Jas určitého světelného toku lze tedy vypočítat ze vztahu:

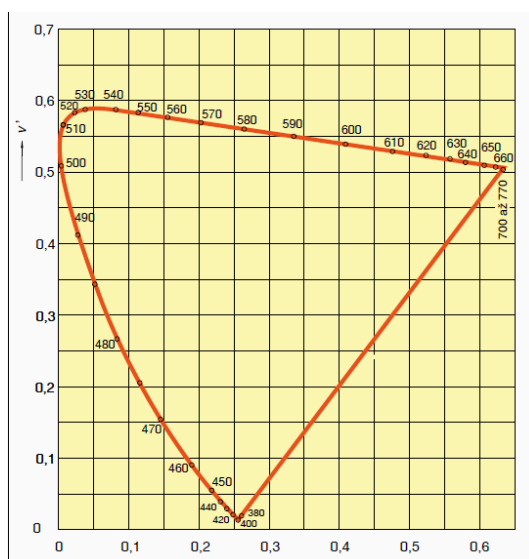
$$L = 683 \cdot Y \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (1.3)$$

kde Y je určena z rovnice

$$Y = \int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1.4)$$

$\varphi_{e\lambda}$  – poměrná spektrální hustota zářivého toku ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ )

V kolorimetrickém prostoru XYZ i v jeho rovinném řezu, což nahrazuje kolorimetrický trojúhelník xy, nejsou v různých místech shodné lineární vzdálenosti stejných subjektivně vnímaných rozdílů vjemu barev. Tam, kde je třeba rozdíly chromatičnosti světel či kolority předmětů popsat charakteristikami odpovídajícím subjektivnímu vjemu, používají se rovnoměrné kolorimetrické prostory nebo diagramy. Na mezinárodní úrovni máme dvě normalizované soustavy, první soustava  $L^* u^* v^*$ , nazývaná CIE LUV a druhá soustava  $L^* a^* b^*$ , zkráceně CIE LAB. Tyto dvě soustavy mají číselné hodnoty jen přibližně srovnatelné a není možné je navzájem převádět. V oboru světelných zdrojů se používá soustava CIE LUV. V této soustavě jsou obecně označovány kolorimetrické souřadnice písmeny  $u^* v^*$ . Soustava CIE LUV má pro případ kdy je veličina  $L^*$  konstantní, tj. světlost subjektivních barev je stejná, přibližně rovnoměrný kolorimetrický trojúhelník (diagram chromatičnosti). [1] [3]

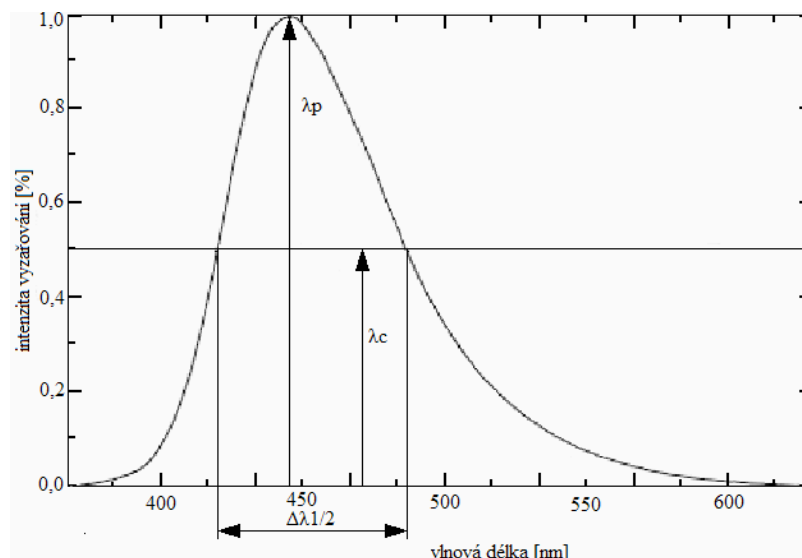


Obr. 1.5 - Rovnoměrný kolorimetrický trojúhelník (diagram chromatičnosti) v souřadnicích  $u^* v^*$  v soustavě CIE LUV 1976 [3]

### 1.4.1. Spektrální charakteristika

Jedná se o sledování vlnové délky, s těmito základními údaji:

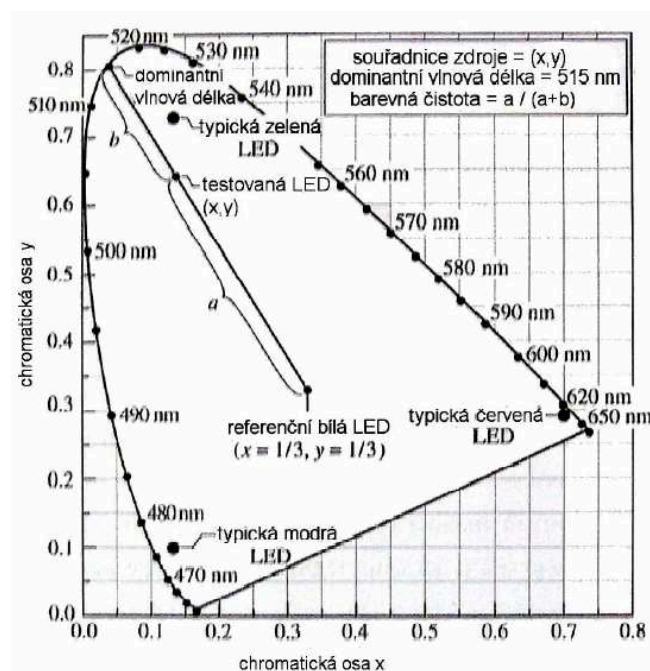
- dominantní vlnová délka  $\lambda_{\text{dom}}$  (nm) – jedná se o vlnovou délku ležící na okraji diagramu chromatičnosti
- vrcholová vlnová délka  $\lambda_{\text{peak}}$  (nm) – vlnová délka v nejvyšším bodě vyzářeného spektra
- centrální vlnová délka  $\lambda_{\text{cent}}$  (nm) – definována podílem integrálních vzorců, viz. Obr. 1.6
- rozsah vlnových délek v rozmezí poloviční intenzity vyzařování  $\Delta\lambda_{1/2}$  [4]



Obr. 1.6 - Spektrální charakteristika [4]

### 1.4.2. Barevná čistota světla

V trichromatickém diagramu je definována jako vzdálenost od zdroje o souřadnicích  $(x, y)$  k souřadnicím referenčního zdroje světla, dělená vzdáleností od referenčního zdroje k souřadnicím dominantní vlnové délky. Referenční zdroj bílého světla má souřadnice  $x = 0,33, y = 0,33$ . [4]



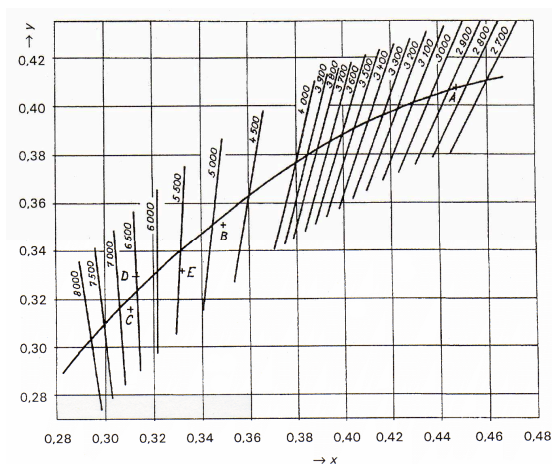
Obr.1.7 - Ukázka výpočtu barevné čistoty [4]

### 1.4.3. Teplota chromatičnosti

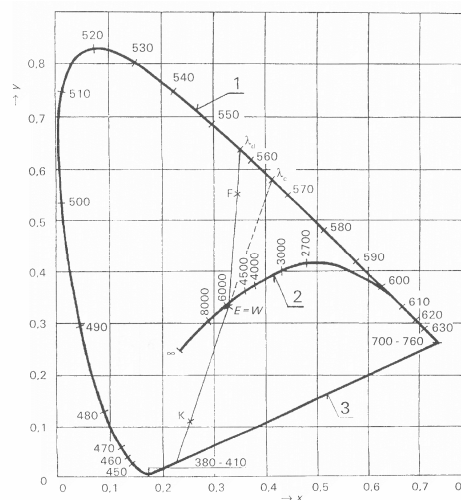
Neuvažujeme-li světelný tok nebo jas zdroje, lze k vystižení barevných vlastností světla, které vyzařují teplotní zdroje, kromě výše popsaných trichromatických souřadnic využít též teplotu chromatičnosti. Teplota chromatičnosti  $T_c$  (teplota barvy neboli barevný dojem) se dá vyjádřit jako světlo určité teploty chromatičnosti a má barvu tepelného záření vydávaného černým tělesem zahřátým na tuto teplotu. Teplota chromatičnosti se měří v Kelvinech. Převážně se pracuje s hodnotou  $T_c$  (K) násobenou  $10^6$ , tj.

s veličinou  $\frac{10^6}{T_c}$  udávanou v převrácených megakelvinech ( $\text{MK}^{-1}$ ). V diagramu chromatičnosti je

zakreslena čára teplotních zářičů s vyznačenými hodnotami teploty chromatičnosti  $T_c$ . obr. 1.7



Obr. 1.8 – Čára teplotních zářičů



Obr. 1.9 – Diagram chromatičnosti

### 1.4.4. Munsellův atlas barev

Způsob specifikace barev kolorimetrickou soustavou, která je popsána v horním odstavci, je pro praktické použití obtížně využitelné, a to z toho důvodu, že pro správné určení barevných vzorků podle jejich trichromatických souřadnic je bez speciální techniky velmi náročné. Proto byly vytvořeny takzvané atlasy barev, jedná se o vzorníky barev natištěných na plastové nebo papírové podložce. Pro představu si ukážeme nejznámější atlas, což je Munsellův atlas, který se používá pro určování barvy (kolority) předmětů pozorovaných v denním světle. Jednotlivé barevné vzorky jsou určeny třemi údaji: barevným tónem (hue), světlostí (value), a sytostí (chroma), tyto parametry mají každý uvedenou svou stupnici hodnot. Dále se vzorky dělí podle barevných tónů a ty pak pro větší přesnost dále na různé odstíny jednotlivých barev. [3]

### 1.4.5. Podání barev

Vnímání barvy jakéhokoli předmětu je dáno především spektrálním složením záření zdroje, které pozorovaný předmět osvětluje, a také spektrálním činitelem prostupu a odrazu daného předmětu. Vjem barvy je ovlivněn především také zrakem jednotlivých pozorovatelů s ohledem na různou

citlivost k jednotlivým barvám a také s ohledem na stav adaptace zraku podle toho, jaké osvětlení (o jaké intenzitě) převládá v zorném poli. Člověk je dnes již navyklý na barevný vzhled předmětů ve slunečním světle i ve světle žárovkovém, považuje tyto vjemy za normální. Proto při pozorování předmětů ve světle s odlišným spektrálním složením (výbojové zdroje) v porovnání s teplotními zdroji dochází k velkému zkreslení vjemu barvy osvětlovaného předmětu. S těmito problémy se můžeme setkat v běžném životě převážně na večerní ulici osvětlené veřejným osvětlením, v obchodě i v průmyslové výrobě. [3] [5]

## **1.5. LED diody a podání barev**

Index podání barev  $R_a$  je v podstatě hodnocení věrnosti barevného vjemu z jakéhokoli zdroje s barevným vjem viditelným při pozorování předmětu nasvíceného sluncem. Hodnota  $R_a$  je bezrozměrné číslo od 0 do 100. Pokud hodnota  $R_a$  klesne až na 0, není možné v takovémto osvětlení rozeznávat barvy. Oproti tomu pokud je  $R_a = 100$ , jedná se o zdroj, při jehož osvětlení je možno přirozeně vnímat podání barev. Pro lepší orientaci je uvedena velikosti  $R_a$  u různých světelných zdrojů: žárovka  $R_a = 95$ , zářivka  $R_a = 80$  a sodíková nízkotlaká výbojka  $R_a = 0$ .

U LED diod jsme schopni běžně dosáhnout hodnoty  $R_a = 80$ , což je minimální hodnota pro osvětlení v kancelářích daná evropskou normou EN 12464 – 1. Dnes jsou k dispozici LED světelné zdroje s  $R_a = 65$  ale i  $R_a = 90$ . Nevýhodou je však to, že zdroj s dobrým  $R_a$  má špatný měrný výkon ( $\text{lm/W}$ ) a naopak. Lze však kombinovat různé teploty chromatičnosti od teple bílé 2600 K až po studenou bílou 10 000 K. Běžně jsou dostupné LED  $T_c$  8300 K,  $R_a = 75$  s měrným výkonem 140  $\text{lm/W}$ , tyto diody patří ke studeným bílým barvám a LED  $T_c$  2600 K,  $R_a = 90$  s měrným výkonem 110  $\text{lm/W}$ . Z těchto údajů je jasné, že rozdíl v účinnosti diod vyzařujících studenou a teplou bílou barvu je zhruba 20 %.

[5] [19] [20]

## 2. Parametry LED a jejich změny s teplotou a stmíváním

Dříve se LED diody používaly pouze k indikaci provozních stavů, dnes se již v různých světelně technických aplikacích LED diody (LED - Light Emitting Diode) v překladu do češtiny dioda vyzařující světlo, běžně využívají, a to díky stále vzrůstajícímu měrnému výkonu, spolehlivosti, energetické úspornosti, možnosti nové konstrukce svítidel, regulací intenzity světla, barevnosti a rozložení světla v prostoru.

Jedná se o elektronický prvek generující světelné záření při průchodu proudu polovodičovým přechodem. Pracuje tedy na jiném principu než žárovky a výbojky. Určitou nevýhodou je, že polovodičový přechod vyzařuje pouze malou část spektra a toto záření se dá nazvat jako monochromatické. Obecné osvětlování jak vnitřních, tak venkovních prostor požaduje převážně bílé světlo. Pro použití v této oblasti se skládá více čipů s různými barvami dohromady. Tímto se docílí bílé barvy, používají se RGB diody. Výhodou použití světelného zdroje s RGB LED je, že lze získat velkou škálu teplot chromatičnosti (lze změnit nastavení každé LED zvlášť). Využití tohoto jevu lze využít při vývoji svítidel, které mění svou teplotu chromatičnosti v závislosti na cirkadiánních rytmech. Teoreticky lze měnit nastavení i z hlediska vyzařování spektra jednotlivých světelných zdrojů, které reagují odlišně na změny teploty, proudu a dochází k rozdílné degradaci v čase. Pro získání bílé barvy lze dále použít LED čip, který se opatří vrstvou aktivní hmoty, která převede část záření vlnových délek do délek v jiné části viditelného spektra. Tento princip je podobný principu s použitím luminoforu.

LED diody dosahují velké životnosti s malou změnou světelného toku v průběhu života, kdy barevné diody dosahují životnosti 100 000 hodin a bílé 50 000 hodin, což značí, že není třeba se zabývat výměnou světelných zdrojů.

Pro světelnou techniku lze používat pouze diody s bílým světlem. Z důvodu velké tepelné závislosti PN přechodu lze dosahovat pouze příkonu 5 W, což odpovídá světelnému toku 140 lm. Ne vždy však dosahují LED diody požadovaného indexu podání barev  $R_a > 80$ . Například při vyzařování studené bílé je  $R_a > 70$  s měrným výkonem kolem 45 lm/W a při vyzařování teple bílé dosahuje  $R_a > 90$ , měrný výkon je menší 17 lm/W. Velkou výhodou při použití LED diod je možnost měnit teplotu chromatičnosti, barvu světla, intenzitu osvětlení a teoreticky i vyzařovací charakteristiky.

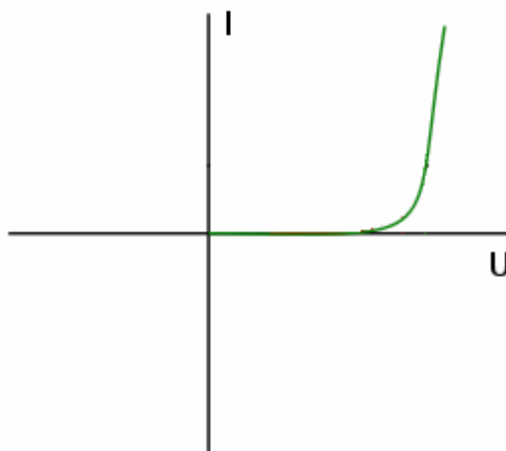
### Výhody LED diod oproti ostatním zdrojům světla

- minimální spotřeba elektrické energie
- bodový zdroj (malé rozměry)
- malé napájecí napětí
- nízká povrchová teplota
- malá závislost parametrů na teplotě okolí
- možnost dosáhnout dobré směrové svítivosti
- odolnost proti nárazům
- rychlý start a restart
- možnost blikání a stmívání

[7]

## 2.1. Základní princip LED

Polovodičová dioda má nelineární vztah mezi proudem a napětím na rozdíl od odporových spotřebičů, v nichž má napětí s proudem vztah lineární. LED je tvořena PN přechodem. Při zapojování je důležité zapojit PN přechod v propustném směru. Pokud tak učiníme, to znamená, že na polovodič typu P přivedeme kladné napětí, začnou do této oblasti přecházet elektrony z polovodiče typu N. Elektrony se v oblasti polovodiče typu P začnou rekombinovat s volnými dírami, které jsou v této oblasti obsaženy. Díky tomuto procesu rekombinace se začne uvolňovat energie v podobě fotonů, které vytvářejí světlo. Ve skutečnosti je tento princip mnohem složitější, ale pro zaměření této diplomové práce nám tento výklad postačí. Je-li napájecí napětí diody nestabilní při jakékoliv změně proudu, dochází také ke změně vyzářeného světelného toku, což znemožní nepřesnou regulaci světelného výkonu. [9]



Obr. 2.1 - Voltampérová charakteristika LED diody

### 2.1.1. Získávání bílého světla

Bílé světlo vidíme tehdy, jsou-li vybudeny tři druhy čípků na sítnici oka v určitém poměru. Trichromatické složky pro bílé světlo jsou lokalizovány v blízkosti středu diagramu chromatičnosti. Vytvořit bílé světlo pomocí LED diod je možné dvěma základními způsoby:

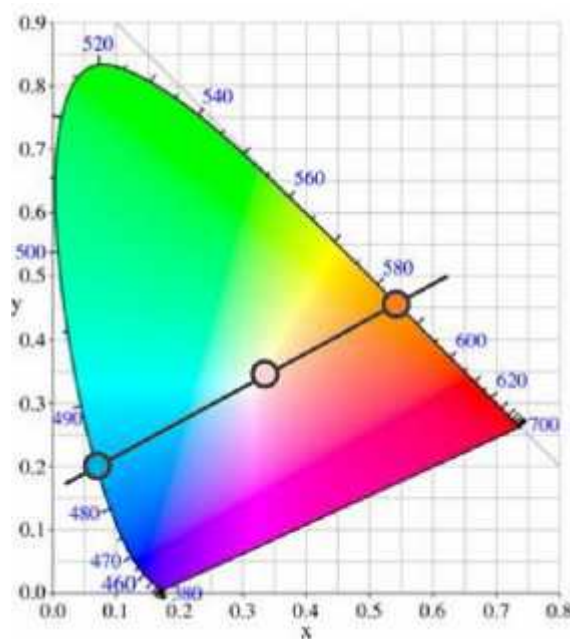
- konvertorem vlnových délek
- mícháním monochromatických LED zdrojů.

Způsob získání bílého světla pomocí LED diodových zdrojů bílého světla má více způsobů a vyvolává otázku, který ze způsobů je optimální. Především je rozhodujícím kritériem měrný výkon a index podání barev. Pro osvětlovací systémy jsou důležité oba parametry.

Lze skládat monochromatické LED (RGB), které v určitém poměru vyzařují bílou barvu - trichromatický zdroj a taktéž dvě monochromatické LED - dichromatický zdroj. Bílé světelné LED zdroje, které se skládají ze dvou monochromatických komplementárních barev, mají vyšší výkon, ale nižší index barevného podání oproti širokopásmovým zářičům a naopak. [8]

### 2.1.2. Komplementární vlnové délky

Princip komplementárních vlnových délek je využíván převážně v LED technologiích. Základem je sečna, která prochází středem kolorimetrického trojúhelníku, ve kterém se nachází oblast bílého světla. Dále pak protíná i dvě strany trojúhelníku o různých vlnových délkách. Smícháním těchto dvou vlnových délek lze vytvořit bílé světlo Obr. 2.2.



Obr. 2.2 - Komplementace dvou vlnových délek [8]

Poměrem výkonů těchto dvou zářičů jsme schopni určovat druh vyzařované bílé barvy (teple bílá, studená bílá). Měrný výkon světelného zdroje složeného z dvou monochromatických LED diod může teoreticky dosahovat hodnot 400 lm/W. Na podobném principu lze vytvořit bílé světlo i pomocí tří monochromatických zářičů (RGB). V tomto případě lze získat všechny barvy řízením intenzity jednotlivých zářičů, jedná se o trichromatický zdroj. [8]

### 2.1.3. Konvertor vlnových délek

Konvertorový materiál, kterým prochází záření kratších vlnových délek bílých LED zářičů, z tohoto záření část zachytí a přemění jej na záření o delší vlnové délce a znovu jej vyzáří. U konvertorů lze teoreticky dosáhnout 100% účinnosti, ale v praxi se pracuje se ztrátami, které závisí na kvantové účinnosti. Důležitými parametry u používaných konvertorů, jako je např. barvivo, polovodičová technika a fosfor, jsou emisní a absorpční vlnová délka. Účinnost je dána vztahem (2.2)

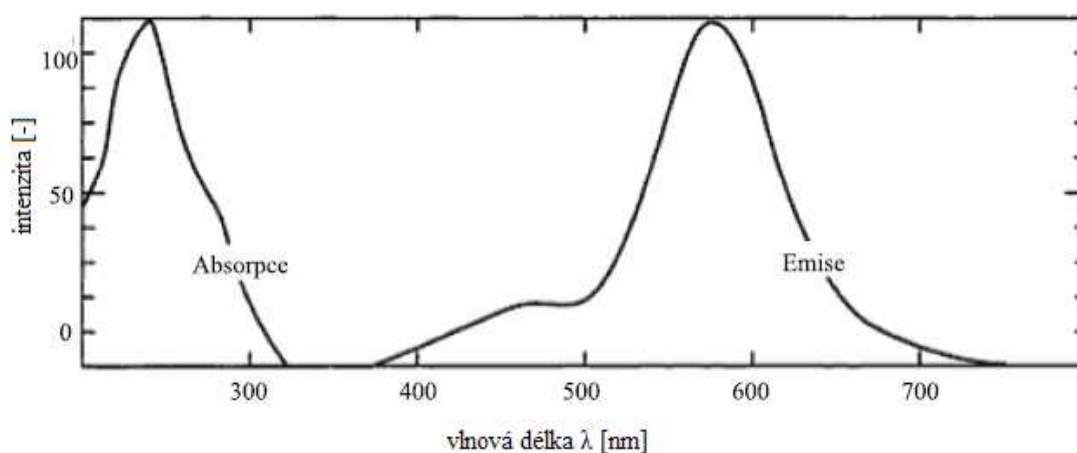
$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\text{počet fotonů vyzářených do prostoru za sekundu}}{\text{počet fotonů injektovaných do LED za sekundu}} = \frac{P / (h\nu)}{I / e} \quad (2.1)$$



$\eta_{\text{ext}}$  – externí kvantová účinnost konvertoru

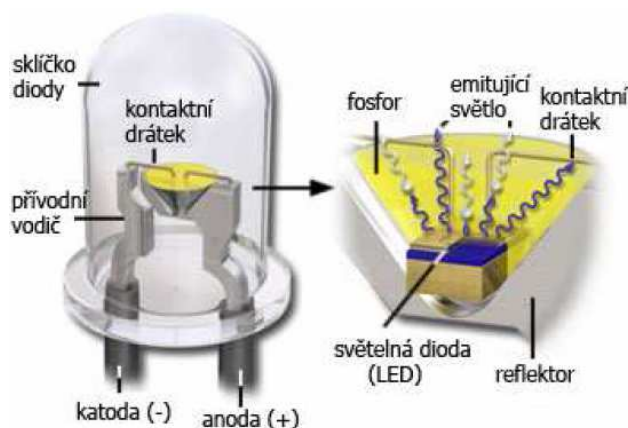
$$\eta = \eta_{\text{ext}} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (2.2)$$

Nejpoužívanějším materiálem pro konvertory je fosfor. Ten v sobě obsahuje anorganickou látku yttrium aluminium garnet (YAG), která je podporována opticky aktivním prvkem, což je prvek vzácných zemin, např. nejrozšířenější je cerium (Ce), pro fosfory (YAG) se používají s kvantovou účinností 75%. Fosfor jako takový je velice stabilní látka a dosahuje kvantové účinnosti až 100%. Vyzáření absorpční a emisní spektrum LED je na Obr. 2.3.



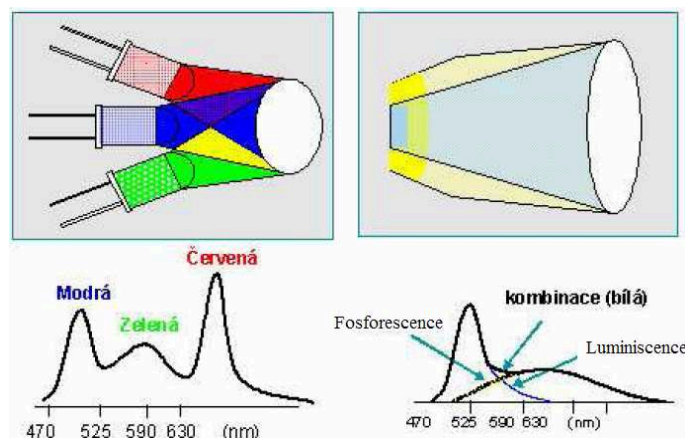
Obr. 2.3 - Absorpční a emisní spektrum fosforu – Typ 4350 [6]

Klasická ukázka bílých LED diod je modrý LED čip (GaInN/GaN) s fosforem (YAG) dotovaným (CE). Čip vyzařuje viditelné záření v modré barvě, tedy na straně krátkých vln. Určitá část záření prochází přímo k pozorovateli a zbytek krátkovlnných fotonů je zachycován (absorbován) ve vrstvě fosforu, která je umístěna v pouzdře a s delší vlnovou délkou vypouštěna ve žlutém spektru, viz Obr. 2.4.



Obr. 2.4 - Bílá vysocesvítivá LED s fosforovým konvertorem [6]

Světlo vyzářené touto diodou se tedy skládá z luminiscence světla modrého a fosforescence světla žlutého na Obr. 2.5 lze porovnat s (RGB) spektrem. Protože u bílých LED diod převažuje část modrého spektra, vyzařuje tedy namodralé světlo s velkou teplotou chromatičnosti kolem 10 000 K (studená bílá). Bílou barvu s nižší teplotou chromatičnosti (teple bílá) lze docílit zvýšením obsahu fosforu a dostat se tím až k hodnotám srovnatelným s běžnými inkandescentními zdroji a to 3200 K. Intenzitu obou vyzářených spekter lze řídit změnou množství fosforu a poměru obsahu epoxidové pryskyřice v něm. [8]

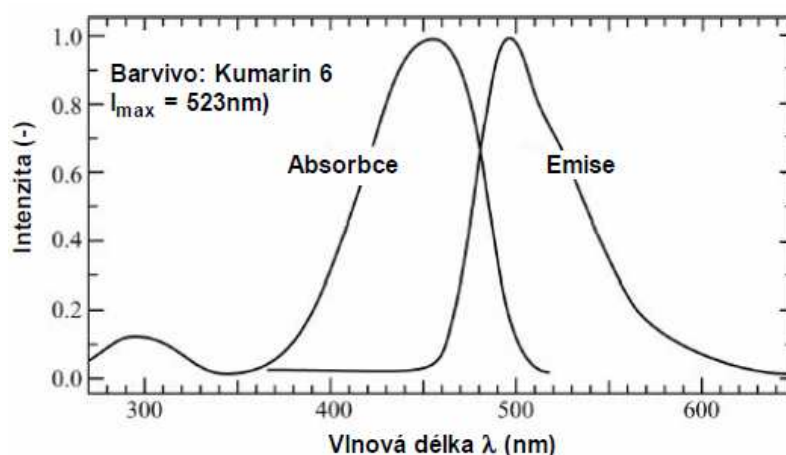


Obr. 2.5 - Porovnání spektra RGB LED s diodou s fosforovým konvertorem [6]

#### 2.1.4. Pro vytváření bílého světla se dále používá konvertor UV záření

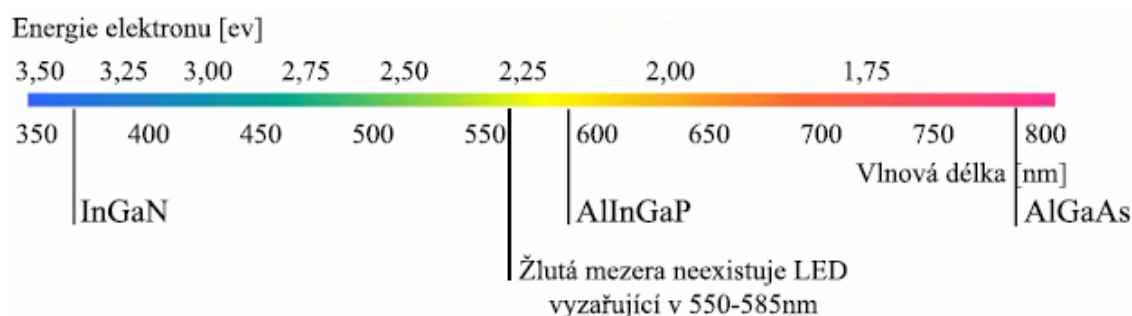
Existuje fosfor používaný u bílých LED diod, který je schopen převádět záření ultrafialových vln na záření viditelné. Jde o to, že samotná dioda (čip) vyzařuje na rozmezí mezi UV a viditelným zářením v intervalu 380 - 400 nm. Označení diody s využitím tohoto způsobu transformace vln je AlGaInN LED dioda. Porovnáním LED AlGaInN s GaInN/GaN strukturami zjistíme, že kvůli většímu obsahu hliníku má nižší světelnou účinnost a nízkou účinnost dotování p-typu ve struktuře AlGaN. UV záření se transformuje pomocí (RGB) fosforu, který přemění vlnové délky na barvy zelené, červené a modré, jedná se tedy o trichromatický světelný zdroj. Takto konstruovaná dioda má index podání barev pouze kolem 60 až 80, diody využívající (YRGB) fosfor (Y – oranžový) mají index mnohem větší až 93, což bez problémů splňuje podmínku minimálního  $R_a \geq 80$  pro trvalý pobyt v místnosti.

Dalším typem konvertoru jsou barviva dosahující kvantové účinnosti i 100%. Zásadní nevýhodou je nestálost organických molekul v závislosti na počtu optických transformací, jejich stabilita je dosažena zhruba po  $10^4 - 10^5$  cyklů. Dále lze považovat za nevýhodu to, že rozdíl mezi absorpčním a emisním spektrem je malý, pohybuje se okolo 50 nm při použití barviva Kumarin 6 Obr. 2.6.



Obr. 2.6 - Absorpční a emisní spektrum barviva Kumarin 6 [6]

Polovodiče jako konvertory jsou charakterizovány úzkým spektrem vyzařování s šířkou  $2kT$  a vnitřní kvantová účinnost dosahuje až 100 %. Tzv. fenomén absolutního vnitřního odrazu u LED s výstupem světla polovodičovým konvertorem není tak znatelný, protože není zapotřebí kontaktů pro polovodiče, které by světlo blokovaly. [8]



Obr. 2.7 - Vyzařování LED v závislosti na použitém materiálu [6]

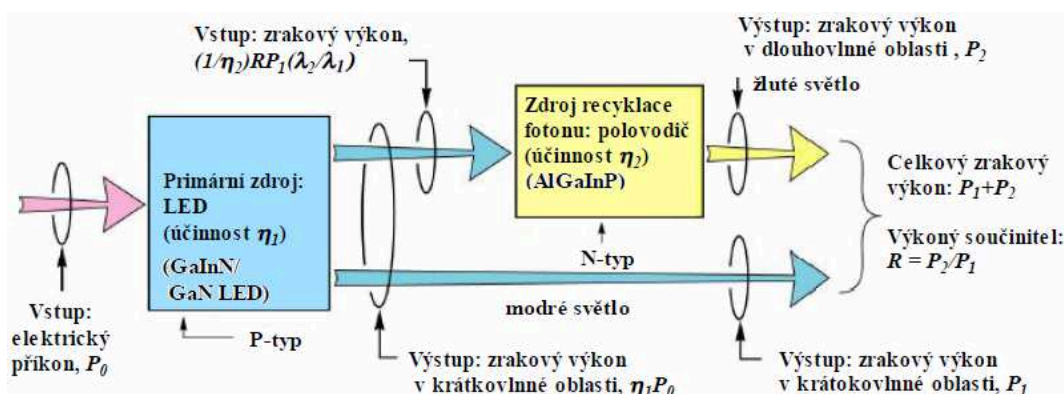
### Bílá LED dioda s polovodičovým konvertorem (PRS – LED)

Opět se jedná o změnu vlnové délky vyzařených fotonů z primární GaInN LED diody. Část těchto fotonů se zachytí v sekundárním polovodiči AlGaInP a znovu emitována s nižší energií Obr. 2.8. Výkonová závislost je znázorněná na Obr. 2.9. Elektrický příkon je označen jako  $P_0$  a výstupní zřakový výkon v modré a žluté spektrální oblasti je označen  $P_1$  a  $P_2$ . Účinnost konverze výkonů modré LED je označena  $\eta_1$  a účinnost recyklace fotonů v polovodiči je  $\eta_2$ . Uvažujeme-li ideální světelný zdroj beze ztrát, kdy  $\eta_1 = \eta_2 = 100 \%$ , pak maximální měrný výkon PRS – LED zářiče nastane při vyzařování primárního zdroje na vlnové délce 440 nm. Teoreticky je možné na této vlnové délce dosáhnout měrného výkonu až 336 lm/W. Při zanedbání odporových ztrát a při 100% kvantové účinnosti bílých LED je teoretický světelný tok viz. Tab. 2.1.

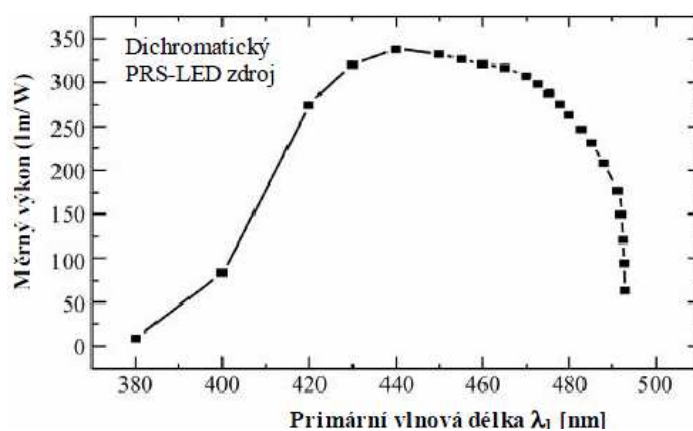
Tab. 2.1 - Teoretický světelný tok různých typů bílých LED diod [8]

| Typy LED                              | Měrný výkon [lm/W] |
|---------------------------------------|--------------------|
| LED s fosforovými konvertory          | 200 - 280          |
| Trichromatický LED zářič              | 240 - 280          |
| Širokopásmový dichromatický LED zářič | 280 - 320          |
| Dichromatický LED zářič               | 300 - 340          |

Dichromatické LED zářiče mají oproti trichromatickým větší měrný výkon a světelnou účinnost., ale nižší index podání barev. Zlepšení indexu podání barev u dichromatického zdroje můžeme docílit pouze rozšířením obou spekter vyzařování nebo přidáním dalšího spektra, což sníží velikost světelné účinnosti a měrného výkonu zařízení. Možnost získání bílého světla pomocí LED zdrojů různými způsoby vyvolává otázku, který ze způsobů je optimální. Rozhodující kritérium je měrný výkon a index barevného podání. Pro signální aplikace je rozhodující měrný výkon. Pro obecné osvětlování jsou důležité obě světelné technické veličiny. Bílé světelné zdroje založené na dvou monochromatických komplementárních barvách vedou k vyššímu měrnému výkonu a nižšímu indexu barevného podání než je tomu u širokopásmových zářičů a naopak. [8]



Obr. 2.8 - Recyklace fotonu v polovodiči LED [8]



Obr. 2.9 – Teoretický měrný výkon dichromatického PRS – LED v závislosti na primární délce [8]

## 2.2. Stmívání LED

V dnešní době, kdy se běžné teplotní zdroje světla nahrazují kompaktními a lineárními zářivkami a diodovými svítidly, je velký zájem o stmívání těchto světelných zdrojů. Ne vždy je totiž zapotřebí maximálního výkonu svítidla, jak z hlediska zrakové pohody, estetických požadavků prostoru, tak i úspory energie. Například tlumení světla v konferenčních místnostech, obzvláště během prezentací. Snížení úrovně v restauracích může zajistit příjemné prostředí pro pohodové večeření a zároveň přidá na estetice prostoru. Ačkoliv je na běžných pracovištích obvyklé mít po celou pracovní dobu stejnou intenzitu osvětlení, naproti tomu kancelářské úkony nevyžadují stejný stupeň osvětlení po celou dobu pracovního dne.

Jako příklad lze použít situaci, kdy 300 lx je nutných při čtení a psaní, kdežto té samé osobě při práci na počítači postačí 30 lx osvětlenosti. Je tedy velkou výhodou, pokud lze snížit výkon svítidla. Tlumená světla zlepšují pracovní prostředí a hlavně šetří energii.

Tradiční světelné zdroje používané pro tyto aplikace jsou teplotní, fluorescentní a halogenová svítidla, z nichž se všechna chovají jinak při stmívání rozdílnou barevností světla. Obecně patrný světelný posun není žádoucí.

Při stmívání bílých LED diodových svítidel dochází k tomuto posunu barevnosti u LED diod generujících bílé světlo konvertorem vlnové délky, tak i vytvořených smícháním RGB diod. Při použití diodových svítidel v běžné osvětlovací praxi by měl jejich barevný posun během stmívání splňovat současné požadavky tradičního světelného zdroje. Stmívání LED diod lze provádět dvěma způsoby. Jeden způsob je trvalé snižování napájecího proudu a druhý je regulace pulzní šířkovou modulací (PWM)

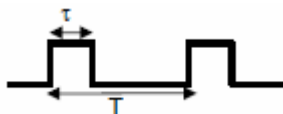
Výrobci LED systémů v dnešní době doporučují pulzní šířkovou modulaci (PWM). Při řízení diody pulzní šířkovou modulací jsme schopni dosáhnout nižších stupňů intenzity a lineárněji řídit intenzitu světla oproti jiným způsobům stmívání. [10] [11]

### 2.2.1. Způsoby stmívání LED

Intenzitu světelného výkonu lze řídit dvěma způsoby. Změnou napájecího proudu a pomocí PWM. Technika řízení proudu v propustném směru je založena na úměrnosti světelného toku v závislosti na napájecím proudu. Nelze zde jako při řízení PWM změnou pracovního cyklu kontrolovat velikost vyzářeného toku. Obě dvě tyto techniky svým způsobem posunují bod barevnosti bílých LED. Metodou řízení změny proudu lze řídit světelný tok od 100 % do 10 %, dosáhnout méně jak 10 % je obtížné. Jedná se o jednoduchý a cenově dostupný způsob stmívání LED diod.

Díky tomu, že LED dioda je polovodičová součástka a lze ji tedy rychle zapínat a vypínat bez zpoždění při změně stavu, je možné ji tedy stmívat pomocí PWM. Při stmívání touto metodou dochází ke změně napětí podle daného impulsu. Touto metodou lze stmívat až do nulových hodnot světelného toku. Důležitá je vysoká frekvence modulace, díky níž se zabrání vnímání jednotlivých světelných pulzů, tedy blikání.

Cyklus  $D$  (střída) je znázorněn na Obr. 2.10, je vyjádřen jako poměr mezi dobou trvání pulzu  $\tau$  a periodou celého cyklu  $T$  (rovnice 2.3). Střídu lze vyjádřit poměrem, např. 1:1 (obě úrovně trvají stejnou dobu), nebo v procentech, kdy daná hodnota v procentech určuje stav „zapnuto“ vůči celkové periodě signálu.



Obr. 2.10 - Grafické znázornění pracovního cyklu.

$$D = \frac{\tau}{T} \quad (2.3)$$

V PWM schématu je proud v propustném směru držen v konstantních hodnotách a pouze se mění doba impulsu. Závislost aktuálního proudu  $I_{AVG}$  na maximálním  $I_{PEAK}$  je vyjádřena rovnicí:

$$I_{AVG} = I_{PEAK} \cdot D \quad (2.4)$$

[11] [13]

### 2.2.2. Posun barevnosti LED při stmívání

Hodnoty barevnosti jsou běžně používány pro charakterizování barevného vzhledu světelného zdroje. Změna barevnosti nastane (posun trichromatických souřadnic), jestliže dojde ke změně spektra a amplitudy vlnové délky. Například v systému RGB diod při malé změně v amplitudě, méně než 1 % a 1 nm posunu vlnové délky jistých barev, může dojít k vnímání barevné změny. Dříve se předpokládalo, že pouze změna teploty má za následek změnu spektra, amplitudy a vlnové délky. [10] [11]

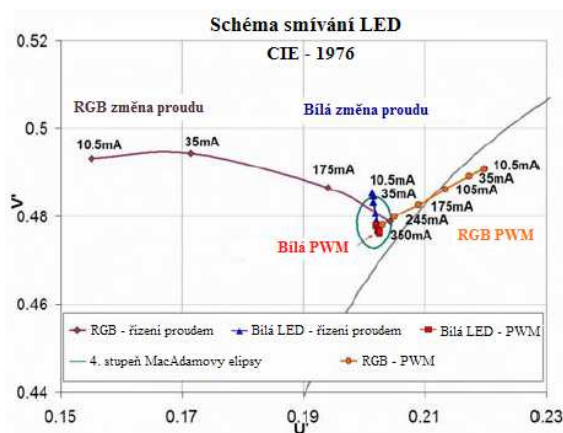
Změna těchto parametrů je rozdílná jak u svítidla tvořeného RGB LEDkami tak i u bílých LED a je také závislá na druhu stmívání. Rozdílné reakce lze nejlépe rozeznat na diodách opatřených od jednoho výrobce. Názorně si ukážeme změny v barevnosti u modré, zelené, červené a bílé LED. Posuny barevnosti jednotlivých diod v závislosti na druhu stmívání jsou znázorněny na Obr. 2.11 a Obr. 2.12. V těchto číslech jsou naměřené hodnoty barevnosti vyneseny na 1931 a 1976 CIE diagramu barevnosti. [10] [11]

Diagram 1931 CIE  $x, y$  je jeden nejvíce známých barevných schémat, avšak 1976 UV je jednotný prostor, který umožňuje porovnání posunu barevnosti. Z těchto čísel je zřejmé, že posun barevnosti bílých LED při tlumení světelného toku oběma metodami od 100% do 3% (stmívání pomocí PWM a pomocí řízení proudu) je velmi malý, méně než čtyři stupně MacAdamovy elipsy. [11]

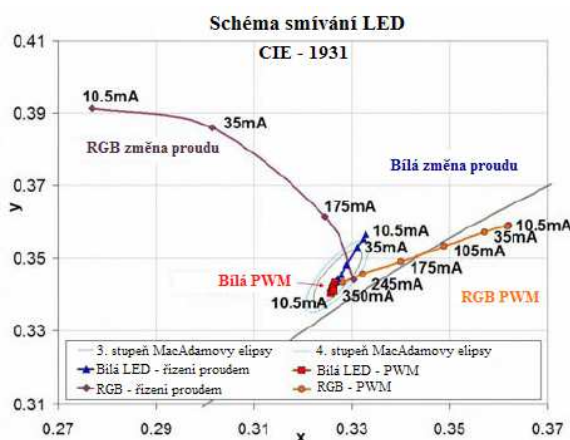
Lidské oko má odlišnou citlivost na různé vlnové délky a je tak schopné rozeznávat malé rozdíly v barvě, ne však malé rozdíly v sytosti. Odchytky barevnosti vyjadřují tzv. MacAdamovy elipsy. Jejich plocha vymezuje oblast, v níž člověk nerozliší změny barvy. [12]



Ve srovnání s RGB diodami má bílá LED posuny barevnosti menší. Z grafů lze také vyčíst, že posuny barevnosti se pohybují v různých směrech, a to jak pro bílou LED, tak pro RGB diody stmívané PWM nebo změnou proudu. [11] [12]



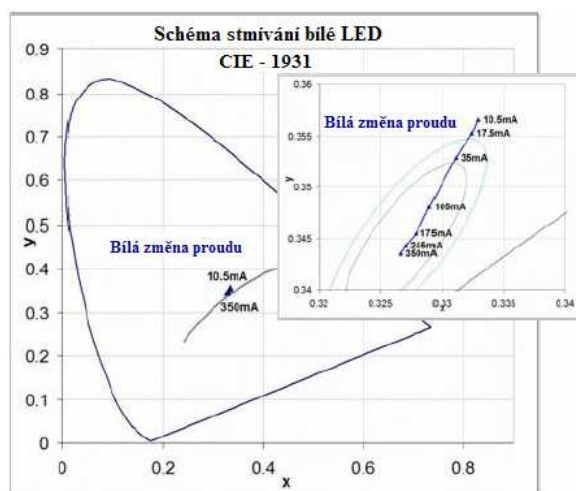
Obr. 2.11 – Výsledky stmívání RGB a bílé LED CIE 1976 ( $u'$ ,  $v'$ ) souřadnicový systém [11]



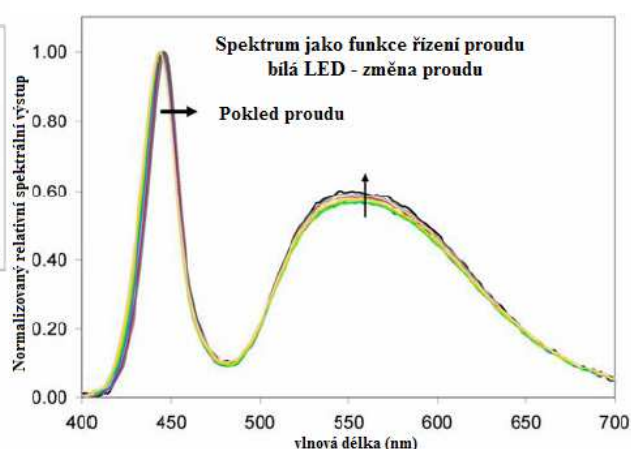
Obr. 2.12 – Výsledky stmívání RGB a bílé LED CIE 1931 ( $x'$ ,  $y'$ ) souřadnicový systém [11]

### 2.2.3. Posun trichromatických souřadnic bílé LED

Posun barevnosti u bílé LED je znázorněn na Obr. 2.13, kde je tato dioda stmívána metodou řízení proudu. Změny v spektru bílé LED jsou na Obr. 2.14, obrázek dokládá také to, že se relativní příspěvek emisí fosforu (vrchol vlnových délek okolo 555 nm) zvyšuje díky tomu, že je systém tlumen ze 100 % na 3 %. To podporuje posun barevnosti směrem ke žluté barvě za nižšího proudu a naznačuje, že fosfor se stává efektivnější. Dalším důležitým poznatkem je, že emise vrcholu vlnové délky a krátké vlnové délky (cca 460 nm) se posune směrem k delším vlnovým délkám. Není patrné, jestli v tomto bodě narůstá účinnost fosforu vlivem snížení teploty nebo vlivem maximální vlnové délky na posun v oblasti krátkých vlnových délek, jejichž emise způsobují vyšší absorpční účinnosti fosforu. [11] [12]

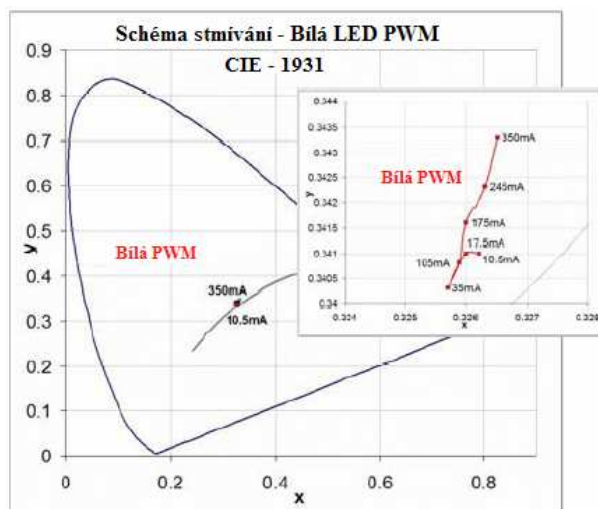


Obr. 2.13 – Stmívání bílé LED změnou proudu [11]

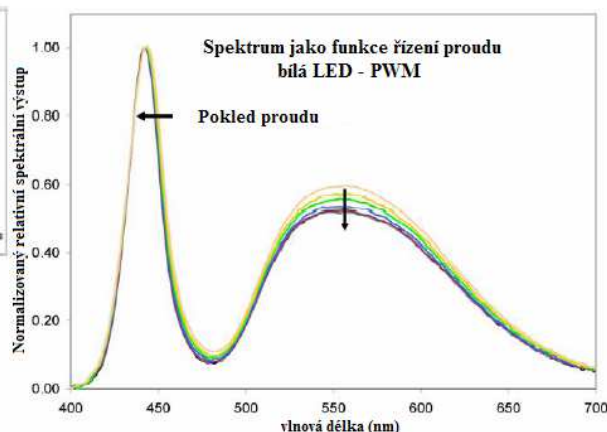


Obr. 2.14 – Změna spektra bílé LED [11]

Na dalším obrázku Obr. 2.15 je zachycen posun barevnosti bílé LED stmívané pomocí PWM. Zde je posun v opačném směru a velikost posunu je menší než při použití metody řízení napájecího proudu. Obr. 2.16 ukazuje, že při tlumení ze 100 % na 3 % podíl emisí fosforu klesá. Z tohoto je jasné proč se posun barevnosti posunul směrem k modré barvě (kratší vlnové délky) při nižším proudu a naznačuje, že vrstva fosforu se stává méně efektivní. Část vyzářeného spektra v oblasti krátkých vlnových délek se posune ještě více na stranu krátkých vln. Vzhledem k tomu, že účinnost fosforu klesá, je-li dioda tlumena pomocí PWM a jak bylo řečeno část spektra krátkých vlnových délek se posunula ještě více doleva, je patrné, že dojde ke snížení výkonu v oblasti vlnových délek převedených fosforem (okolo 550 nm). [11] [12]



Obr. 2.15 – Stmívání bílé LED pomocí PWM [11]

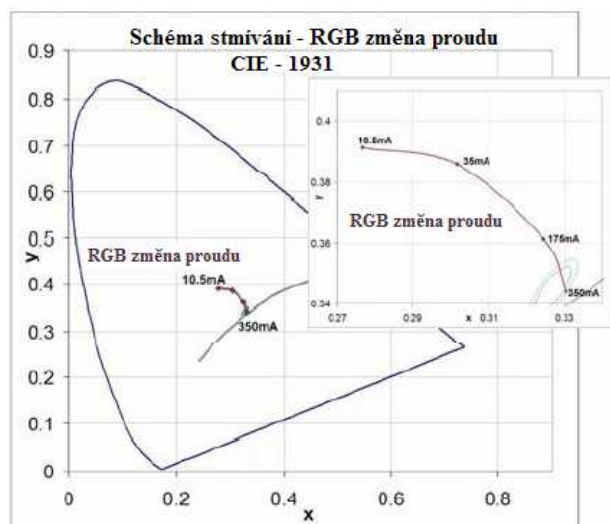


Obr. 2.16 – Změna spektra bílé LED [11]

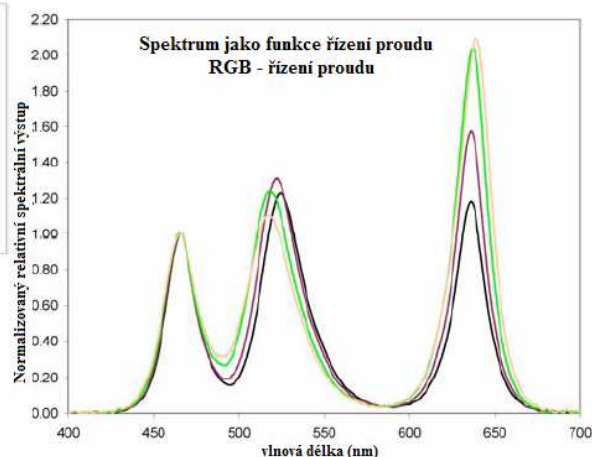
#### 2.2.4. Změna barevnosti RGB LED řízených změnou proudu a pomocí PWM.

Obr. 2.17 ukazuje velikost a směr posunu barevnosti světla vyzářeného třemi barevnými LED (RGB) stmívanými změnou proudu. Na dalším Obr. 2.18 je patrné, že relativní podíl zeleného záření (vrchol vlnové délky okolo 525 nm) se zvyšuje a posunuje směrem k oblasti delších vlnových délek, kdežto červené záření (vrchol vlnové délky kolem 620 nm) se snižují a posunují směrem ke kratším vlnovým délkám viditelného spektra záření, opět při stmívání od 100 % do 3 %. Výsledkem tohoto jevu je změna barevnosti směrem k zelené barvě při snižování proudu.



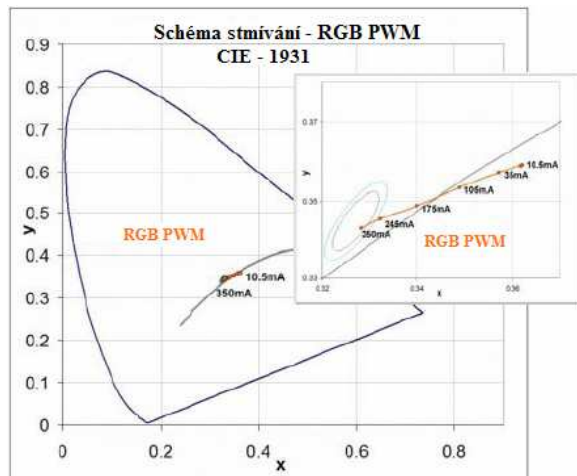


Obr. 2.17 – Stmívání RGB změnou proudu [11]

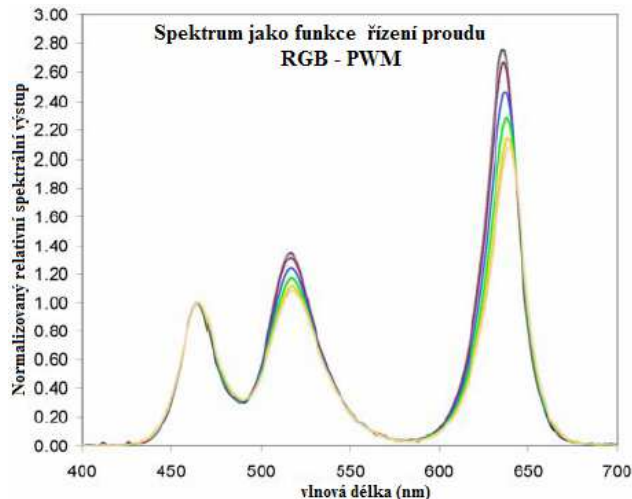


Obr. 2.18 – Změna spektra RGB [11]

Další Obr. 2.19 popisuje změnu barevnosti RGB diod tlumených pomocí PWM. Zde dochází k posunu v opačném směru, který není tak velký, jako při řízení změnou proudu. Obr. 2.20 znázorňuje relativní podíl záření RGB, při stmívání ze 100 % do 3 %. Relativní příspěvky červeného a zeleného záření se snižují s klesající úrovní světelného toku a maximální vlnová délka u obou barev se snižuje také a posunuje směrem k delším vlnovým délkám. To vysvětluje posun barevnosti k červeno-jantarové oblasti při stmívání pomocí PWM. [10] [11] [12]



Obr. 2.19 – stmívání RGB pomocí PWM [11]

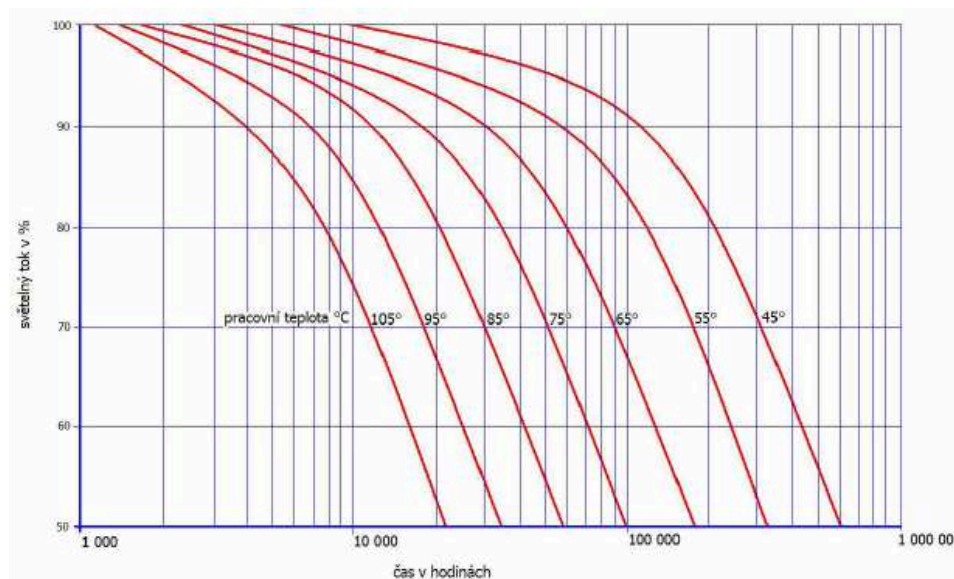


Obr. 2.20 – změna spektra RGB [11]

## 2.3. Teplotní závislost LED

Životnost bílých LED diod se pohybuje okolo 50 000 hodin svícení. V tomto čase jejich světelný tok klesá. Velký vliv na pokles světelného toku má teplota PN přechodu. Pokud je tato teplota větší než maximální dovolená teplota udávaná výrobcem, životnost světelné LED diody se značně zkracuje. Při

zlepšení odvodu tepla z PN přechodu docílíme delší životnosti až do 100 000 hodin. Je tedy patrné, že v porovnání s ostatními zdroji světla je LED dioda mnohem spolehlivější.



Obr. 2.21 – Závislost životnosti a teploty LED (teplota na PN přechodu)

Teplota PN přechodu je ovlivňována třemi základními parametry:

- teplotou v bezprostředním okolí LED diod
- tepelným odporem mezi PN přechodem a vnějším okolím
- množství energie kterou dioda nevyzaří v podobě světla.

Pro udržení teploty v přípustných mezích, které jsou stanoveny v každém katalogovém listu výrobce, je zapotřebí navrhnout taková konstrukční provedení, díky kterému bude možno odvézt přebytečné teplo vyzařené LED diodou. Jako u jiných zdrojů, je i u LED diod základním způsobem odvádění tepla připevnění čipu k pasivnímu chladiči, ten odvádí teplo do okolí. Diody v menších výkonových řádech chlazení nepotřebují, dokáží se uchladiť samy. Výkonové diody však chladit musíme, jejich výkon se pohybuje v řádech wattů a v určitých případech již pasivní chladiče nestačí. Lze tedy použít zařízení pro výměnu vzduchu mezi ploškami chladiče, např. membránu, která se rozkmitá pomocí elektrického obvodu a tím uvede do pohybu vzduch v okolí chladiče, čímž dochází k rychlejšímu ochlazování.

Vysvětlení pojmů:

Tepelný odpor – jedná se o převrácenou hodnotu tepelné vodivosti a udává míru schopnosti určitého materiálu zadržet odvod tepla. Udává se v jednotkách  $1 \text{ K.W}^{-1}$  nebo  $1 \text{ °C.W}^{-1}$ . U výkonových LED je tepelný odpor tvořen dvěma cestami v sérii, které ovlivňují PN přechod.

1. Je to prostor mezi PN přechodem a dnem pouzdra, ve kterém je čip uložen.
2. Tepelná cesta, vedená z tepelného kontaktu okolního prostředí.

Při návrhu osvětlení s výkonovými LED, je důležité řídit se několika zásadami:

- návrh konstrukce by měl být proveden tak, aby teplota uvnitř čipu byla co nejnižší a také aby kolem systému mohl samovolně proudit vzduch a odvádět tak přebytečné teplo.
- snížit co nejvíce množství tepla, které je třeba odvézt. Toho docílíme oddělením řídicích obvodů od LED čipů, aby nedocházelo k ovlivňování tepelných přechodů vlastní teplotou řídicích prvků.
- velmi důležitou podmínkou je snížení tepelného odporu mezi čipem a chladičem. Množství odvedeného tepla do chladiče je úměrné kondukci (vedení) tepla z čipu do chladiče. Dále je pak teplo převáděno do okolí pomocí konvekce (proudění) tepla.
- maximální konvekce vzduchu docílíme správným osazením výkonových LED diod na chladiči.

[4] [18]

### 3. Sestavení říditelného zdroje pro LED

Cílem této diplomové práce je mísení RGB a bílých LED za účelem dosažení špičkových parametrů. Je tedy zapotřebí vyrobit pro tento účel říditelný zdroj malého stejnosměrného napětí, který bude mít čtyři na sobě nezávislé výstupy. Na tyto výstupy bude možné připojit čtyři LED, na každý výstup jednu. Abychom mohli hledat různá nastavení, je třeba tyto výstupy řídit každý zvlášť.

Pro ovládání jednotlivých diod budou sloužit čtyři potenciometry. Na tomto zdroji bude možné odečítat napětí  $U$  a proud  $I$  všech diod. Pro zjednodušení a zmenšení bude zdroj osazen jen jedním digitálním voltmetrem a jedním digitálním ampérmetrem, ty budou přepínatelné mezi jednotlivými výstupy (diodami). Na levé straně zdroje bude patice pro připojení počítačového zdroje z 230 V/12 V. Dále bude zdroj osazen digitálním teploměrem, který bude snímat teplotu LED. Na pravém boku zdroje budou připevněny rychloupínací svorky pro připojení napájení LED a čidla teploty.

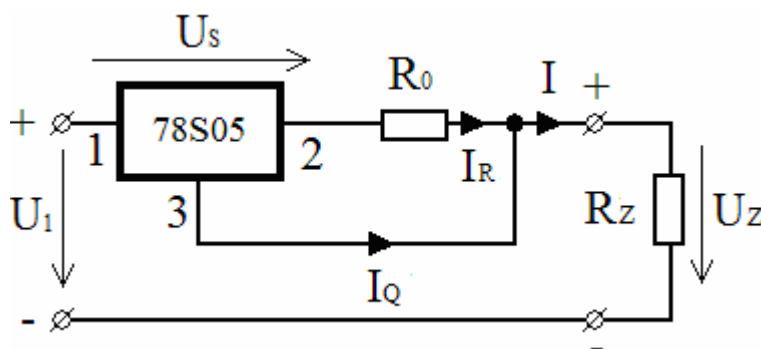
Tento zdroj bude používán pro měření LED převážně v kulovém integrátoru. V tomto zařízení se umísťuje zdroj světla přesně do středu integrátoru. Do těchto míst vede ze dna spodní polokoule distanční trubice, kterou se protáhnou vodiče přiletované k diodám a vodiče čidla teploty směrem ven ke zdroji. Trubice má průměr 10 mm, což znamená, že není možné, aby opačné konce přívodních vodičů LED a čidla teploměru byly opatřeny jakýmkoliv konektory. Z tohoto důvodu budou konce vodičů pouze odizolovány a vkládány do rychloupínacích svorek na boku zdroje.

#### 3.1. Teorie zdroje proudu se stabilizátory napětí

Podle Ohmova zákona můžeme zdroji proudu vytvořit referenční napětí na odporech, je možné také opačně sestavit zdroj proudu ze zdrojů referenčních napětí. Můžeme použít jakýchkoli stabilizovaných zdrojů napětí, ale pro tuto práci postačí zapojení s třípinovým lineárním stabilizátorem napětí, toto zapojení je velmi jednoduché. [14]

##### 3.1.1. Proudový zdroj s třípinovým stabilizátorem napětí

Třípinový stabilizátor je ve schématu v základním zapojení na Obr. 3.1



Obr. 3.1 – Základní zapojení zdroje proudu  $I$  s třípinovým stabilizátorem napětí. [14]

Funkce tohoto zapojení je dána stabilizací napětí mezi svorkami 2 a 3 integrovaného stabilizátoru, např. typu **78S05-TO220** použitého pro zapojení ve zdroji proudu pro LED. Díky tomuto stabilizovanému napětí je na odporu  $R_0$  udržován konstantní proud o velikosti:

$$I_R = \frac{U_{stab}}{R_0} \quad [A] \quad (3.1)$$

Nesmíme zapomenout, že tento proud se sčítá s paralelně jdoucím proudem  $I_Q$ , jehož velikost představuje vlastní spotřebu integrovaného stabilizátoru. Tyto dva proudy společně vtékají do zátěže  $R_Z$ :

$$I = I_R + I_Q \quad [A] \quad (3.2)$$

Jsou tedy patrné dvě základní podmínky činnosti tohoto typu zdroje:

První podmínka je, že výstupní proud  $I$  nemůže dosáhnout nižších hodnot než je proud vlastní spotřeby  $I_Q$ , ten se může pohybovat od hodnot  $50 \mu A$  až do hodnot  $5 mA$ .

Druhá podmínka - pro nastavování proudu do zátěže odporem  $R_0$ , je nutné, aby velikost proudu  $I_Q$  byla zanedbatelná oproti  $I_R$ .

Pro správnou funkci potřebuje integrovaný stabilizátor obsahující sériový regulační tranzistor minimální napětí  $U_S$ , jinak nemůže správně pracovat. Jde tedy o to, aby tento tranzistor pracoval ještě pořád mimo oblast saturace v lineární části svých výstupních charakteristik a byl schopen se zavírat a otevírat, čemuž se rovná princip regulace sériovým členem. Toto napětí obvykle bývá  $2$  až  $3 V$ .

Vstupní napětí musí tedy mít minimální velikost pro maximální předpokládanou hodnotu odporu zátěže.

$$U_{INmin} = U_{Smin} + U_{stab} + R_{Zmax} \cdot I \quad [V] \quad (3.3)$$

$U_{INmin}$  – minimální vstupní napětí integrovaného stabilizátoru

$U_{Smin}$  – minimální napětí na int. stabilizátoru

$U_{stab}$  – napětí mezi svorkami 1 a 2

$R_{Zmax}$  – maximální ohmická hodnota odporu zátěže

Tyto zdroje stabilizovaného napětí se vyrábějí pro poměrně velké výstupní proudy, je jednoduché s nimi sestavit zdroje proudu o velikosti desetin až jednotek ampéru, což není u jiných zapojení tak snadno realizovatelné. Nevýhodou je poměrně velká výkonová ztráta na odporu  $R_0$ , u kterého může dojít při značném tepelném namáhání ke změně své ohmické hodnoty a tím zapříčiní změnu nastaveného výstupního proudu. [14]

### 3.1.2. Regulovatelný zdroj proudu pro napájení LED

Použité zapojení je podobné zapojení popsanému v předchozí kapitole. Vstupní napětí je 12 V ze síťového napájecího adapteru, na vstupu uvnitř zdroje je paralelně připojen výkonový odpor  $R_1$  o odporu 10  $\Omega$ . Tento bude tvořit stabilní zátěž pro napájecí adaptér, bude odebírat výkon:

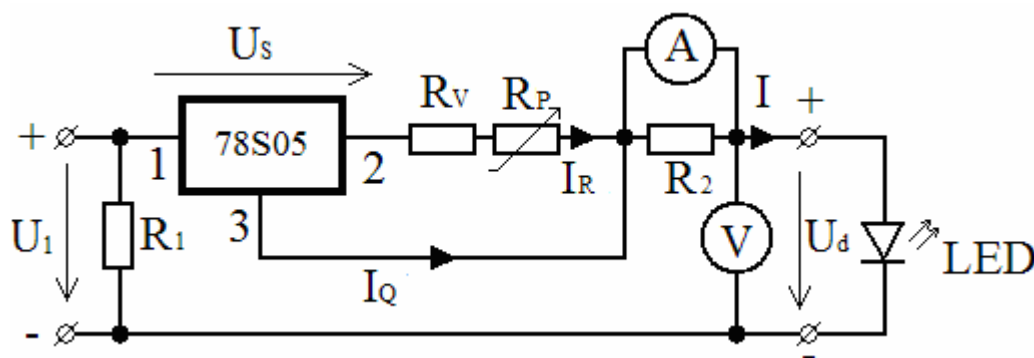
$$P = \frac{U^2}{R_1} = \frac{12^2}{10} = 14,4W \quad (3.4)$$

Základem je již zmíněný integrovaný stabilizátor typu **78S05-TO220**. Místo odporu  $R_0$  je do obvodu vřazen drátový potenciometr  $R_P$ , který řídí velikost proud tekoucího do zátěže  $R_Z$ . Mezi svorku 2 a potenciometr  $R_P$  je nutno zapojit výkonový odpor  $R_V$  s ohmickou hodnotou 5  $\Omega$  a výkonem 5 W, a to z toho důvodu, aby nedocházelo k přetěžování diody, jejíž maximální proud je jen 1 A, přičemž stabilizátor může do obvodu dodat až dvojnásobek. Výkonový odpor tedy odebere podle vzorce (3.6) výkon 5 W.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{5}{5} = 1A \quad (3.5)$$

$$P = R \cdot I^2 = 5 \cdot 1^2 = 5W \quad (3.6)$$

Dále je pak v obvodu zapojen v sérii odpor  $R_2$ , s přesnou hodnotou 0,1  $\Omega$ , tento odpor slouží k měřicím účelům – je z něj snímán úbytek napětí. Dále je jen vývod na napájenou LED, ke které je paralelně připojen voltmetr. Schéma zapojení regulovatelného zdroje proudu je na Obr. 3.2. Nevýhodou tohoto zapojení je, že je značná část energie přeměňována na nepotřebné teplo. [14]

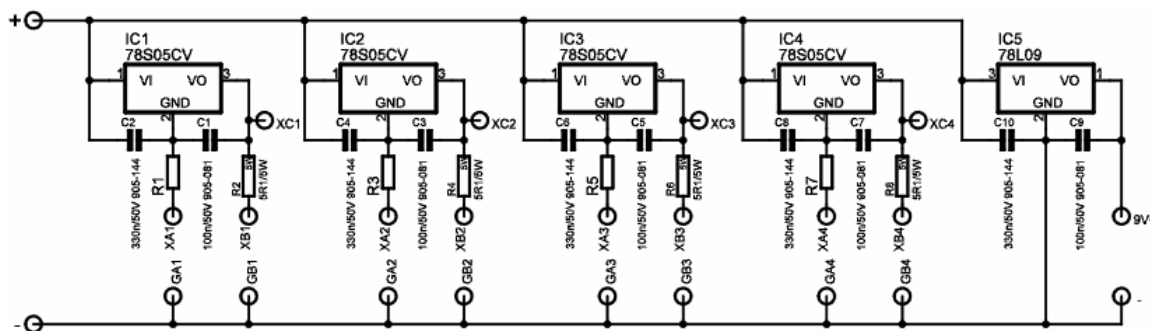


Obr. 3.2 – Zapojení regulovatelného zdroje proudu pro jednu LED

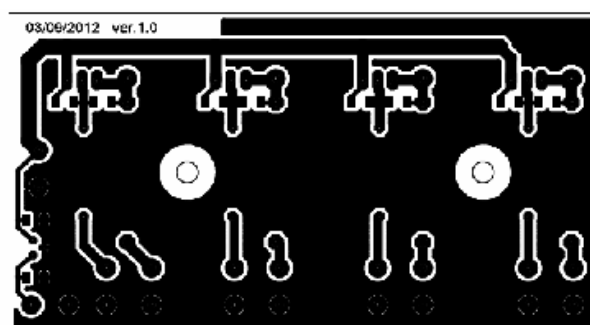
### 3.2. Návrh plošného spoje

Uvnitř zdroje se nachází mnoho součástek, ne všechny jsou připevněny do stěn plastové montážní krabice. Je nutné je tedy osadit do plošného spoje, tímto se zamezí možnosti dotyků různých vodičů a prostor uvnitř krabice bude značně přehlednější. Jelikož integrované stabilizátory napětí musí být

chlazeny, což obstarává hliníkový chladič o rozměrech 100 mm x 70 mm x 20 mm, je plošný spoj navržen tak, že po přišroubování stabilizátorů k chladiči se k němu jejich vývody ohnou kolmo a plošný spoj se na tyto konce nasune a připájí. Pro zlepšení tepelných podmínek a zamezení přehřátí výkonových odporů se i tyto připevní k chladiči. Dále je pak na plošném spoji kromě výše zmíněných součástek stabilizátor napětí 78L09; 9 V; 0,1 A pro napájení měřicích přístrojů (teploměr je napájen z baterie). Plošný spoj byl navržen v programu Eagle a poté vyroben v laboratoři VŠB TU Ostrava. Na Obr. 3.3 a Obr. 3.4 jsou zobrazeny výstupy z programu Eagle.



Obr. 3.3 – Schéma plošného spoje



Obr. 3.4 – Plošný spoj proudového zdroje

### 3.3. Digitální teploměr

Pro snímání teploty LED je použit digitální vestavný teploměr PM TEMP1, který je na Obr. 3.5. Tento teploměr má vlastní zdroj 1,5V baterii, zobrazení teploty lze přepínat ve stupních celsia °C nebo ve farenheitech °F. Přepínač on/off je umístěn na zadní stěně teploměru, což by po zabudování do krytu zdroje znemožnilo ovládání teploměru. Z tohoto důvodu byl teploměr rozebrán a na kontakty vypínače byly napájeny drátky, které jsou propojeny s tlačítkem umístěným v krytu zdroje vedle teploměru. Teploměr je s čidlem propojen vodičem o délce 300 cm. Pro použití v naší aplikaci je tato délka příliš a také je zapotřebí, aby čidlo bylo od teploměru odpojitelné z důvodu, aby bylo možné jej provléci distanční trubicí ven z kulového integrátoru. Pro naše potřeby postačí délka vodiče k čidlu přibližně 1,2 m. V čidle teploměru je termistor, s teplotou jeho odpor klesá a naopak.



Obr. 3.5 – Digitální vestavný teploměr PM TEMP1

LED, které budou měřeny, se připevní k hliníkovému chladiči. K tomuto chladiči o rozměrech 50 mm x 50 mm x 20 mm je připevněno čidlo teploty. Měření teploty tímto způsobem nebude přesné, čidlo nebude umístěno v bezprostřední blízkosti čipu. Zvláště při časově krátkých měřeních bude docházet k prodlevám, kdy na teploměru bude teplota nižší než ve skutečnosti na LED čipu. Toto je způsobeno teplotním odporem materiálů. Relativně přesnějších hodnot bude možné dosáhnout při delších měřeních, kdy se teplota čipu i chladiče ustálí na určité hodnotě.

Tab. 3.1 – Technické parametry digitálního teploměru PM TEMP1

| Technické parametry                                     |                         |
|---|-------------------------|
| Měřicí rozsah:  | -50 °C až 70 °C         |
| Přesnost:   | 0,1 °C                  |
| Rozměry displeje:                                       | 12 x 6,5 mm             |
| Délka čidla:  | 300 cm                  |
| Rozměry:  | 52,5 x 27 x 14 mm       |
| Montážní rozměr:  | 51 x 25 mm              |
| Napájení:   | 1 x baterie LR 44 1,5 V |
| indikace slabé baterie, přepínač on/off, přepínač °F/°C |                         |

### 3.4. Měření vstupních parametrů LED

Proto, abychom mohli snímat napětí a proud na měřené LED, byla pořízena 3 a ½ místná panelová měřidla PAN.PM128. Toto měřidlo je schopno měřit napětí, proud, teplotu, PH, osvětlenost, výkon atd. Měřidla jsou napájena pomocí stabilizátoru napětí 9 V / 0,1 A Technické parametry jsou v Tab. 3.2.

Pro správné měření napětí a proudu je třeba nastavit jednotlivá měřidla:

Ampérmetr – měřidlo je nastaveno od výroby na měřicí rozsah 0 – 200 mV. Je zapotřebí změnit jej napětovým děličem na 0 – 2 V. Pro měření proudu v naší aplikaci, je „ampérmetr“ zapojen paralelně k rezistoru  $R_2 = 0,1 \Omega$ . Měřidlo bude snímat



hodnotu úbytku napětí  $U$ , která vznikne protékáním proudu rezistorem  $R_2$ , podle Ohmova zákona  $U = I \cdot R = 2 \cdot 0,1 = 0,2V$ , může protékat rezistorem proud až 2 A (z hlediska překročení rozsahu měřidla), což je dostačující, jelikož maximální proud diody je podle katalogu výrobce 1 A. Po správném nastavení desetinné čárky spojením propojek  $P3$  na zadní části měřidla bude zobrazovaná hodnota na displeji odpovídat skutečné hodnotě napájecího proudu diody. Vstup měřidla bude možné přepínat mezi jednotlivými diodami, pomocí otočného čtyřpaketoého (1 x 4 polohy) přepínače s pájecími vývody. U toho přepínače je důležité přepínání vstupu i výstupu, což u voltmetru není nutné.

Voltmetr - měřidlo je připojeno paralelně přes otočný přepínač dvoupaketový (1 x 4 polohy) s pájecími vývody k měřené diodě. Pro správnou funkci voltmetru je nutné přestavět měřidlo na rozsah od 0 do 20 V. Pomocí děliče napětí lze změnit citlivost přístroje. Na zadní straně měřidla se vymění propojka  $R_B$  a nahradí se rezistorem o hodnotě 9,9 M $\Omega$  a do pozice  $R_A$  se zapojí rezistor o hodnotě 100 k $\Omega$ . Pro potřebné nastavení desetinné čárky se propojí body  $P_2$ . Při změně měřicího rozsahu přístroje je vhodné přístroj zkalibrovat. Kalibrace se provede připojením známého napětí na vstupní svorky měřidla (nejlépe polovičního napětí daného rozsahu) a pomocí trimru  $VR_1$  se nastaví na displeji správná hodnota.

Tab. 3.2 – Technické parametry panelového měřidla PAN.PM128

| Technické parametry        |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| Rozsah měření napětí DC:   | 0 - 200 mV            |
| Způsob upevnění:           | vruty M2              |
| Zobrazovač:                | LCD 3,5 místný, 13 mm |
| Vnitřní odpor:             | 100 M $\Omega$        |
| Zdroj napájení:            | 7 - 11 V DC           |
| Vzorkovací frekvence:      | 2 - 3 Hz              |
| Rozměry:                   | 44 x 68 x 15 mm       |
| Přesnost měření napětí DC: | $\pm 0,5 \%$          |
| Odběr proudu:              | 1 mA                  |
| automatická změna polarity |                       |



Obr. 3.6 – Panelové měřidlo PAN.PM128

### 3.5. Složení říditelného čtyřkanálového zdroje proudu

Celý zdroj je umístěn v konstrukční krabici o rozměrech 180 x 150 x 70 mm, která se skládá ze čtyř dílů. Uvnitř krabice je na zadním dílu v pravé části připevněn pomocí tavného lepidla hliníkový chladič. Stabilizátory jsou k tomuto chladiči připevněny přes izolační silikonové podložky a průchodky. Tímto způsobem je k chladiči připevněn také výkonový odpor tvořící stálou zátěž pro síťový adaptér.

V levé boční stěně zdroje byl vyvrtán otvor o průměru 20 mm a do otvoru byl osazen hlavní vypínač. Vedle vypínače je umístěna v otvoru 8 mm napájecí vestavná zástrčka, do které se připojí síťový adaptér.

Na pravé stěně zdroje jsou připevněny dva reproterminály se čtyřmi rychlospojkami pro připojení měřených LED a jeden reproterminál se dvěma rychlospojkami pro připojení čidla teploty. Jednotlivé páry rychlospojek jsou pro přehlednost při samotném měření označeny stejně jako jednotlivé ovládací knoflíky.

Přední část krabice je osazena třemi digitálními měřidly, nahoře ampérmetr, pod ním voltmetr a úplně vlevo dole teploměr. Otvory pro tato měřidla byly po rozkreslení umístění jednotlivých komponentů vyřezány přímočarou pilou a začištěny pilníkem. Vedle měřidel vpravo jsou umístěny čtyřpolohové přepínače, sloužící k přepínání měřidel mezi jednotlivými LED. Tyto dva přepínače jsou vloženy ve vyvrtaných dírách o průměru 6 mm. Opět jsou pro přehlednost vyznačeny polohy pro jednotlivé výstupy. Pro samotnou regulaci napájecího proudu diod slouží čtyři pod sebou umístěné potenciometry, jsou přichyceny stejným způsobem jako regulátory (otvor s vnitřním průměrem 8 mm). Při montáži bylo zapotřebí zkrátit příliš dlouhé ovládací osičky a opatřit je ovládacími knoflíky s krytkami. Označení ovládacích prvků a výstupů pro LED je provedeno číselně viz Obr. 3.7. Všechny prvky jsou uvnitř zdroje propojeny vodičem o průřezu 0,75 mm<sup>2</sup>. Spojení vodičů s kontakty je provedeno pájenými spoji.

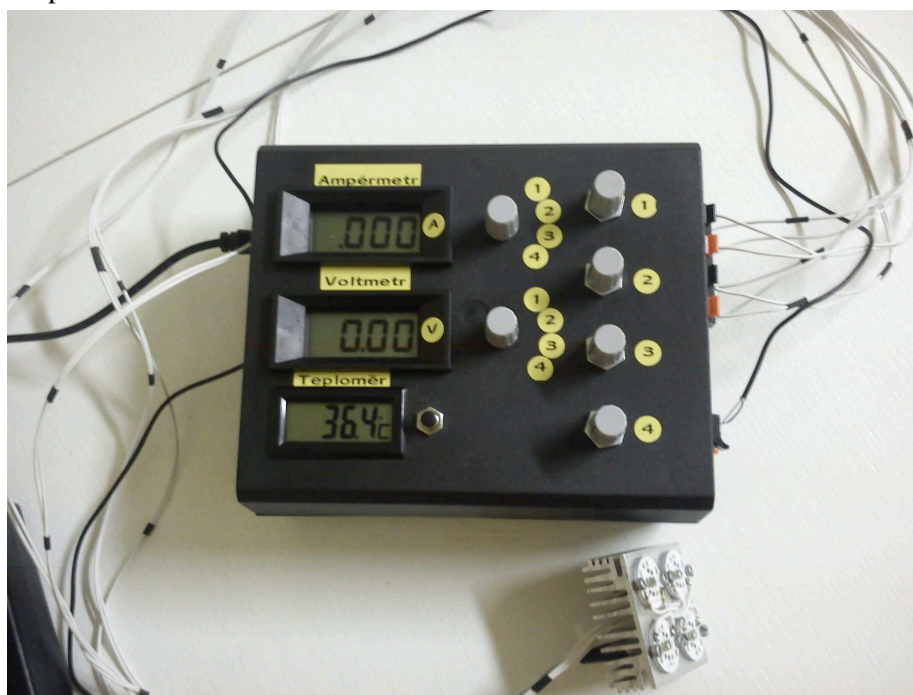
Tab. 3.3 – Součástky použité při stavbě říditelného proudového zdroje pro LED

| Seznam součástek |                              |                    |    |
|------------------|------------------------------|--------------------|----|
| č.               | Název součástky              | Základní parametry | ks |
| 1.               | konstrukční krabice          | 180 x 150 x 70 mm  | 1  |
| 2.               | Digitální měřidlo PAN.PM128  | 0 - 200 mV         | 2  |
| 3.               | Digitální teploměr PM TEMP1  | -50 °C až 70 °C    | 1  |
| 4.               | Drátový potenciometr         | 47 Ω, 4 W, 10 %    | 4  |
| 5.               | Otočný přepínač              | 4 pakety           | 1  |
| 6.               | Otočný přepínač              | 2 pakety           | 1  |
| 7.               | Spínač tlačítkový miniaturní | 250 V/ 1,0 A       | 1  |
| 8.               | Chladič hliníkový            | 100 x 70 x 20 mm   | 1  |
| 9.               | Chladič hliníkový            | 50 x 50 x 20 mm    | 1  |
| 10.              | Rezistor                     | 0,1 Ω, 3 W, 5 %    | 4  |
| 11.              | Rezistor                     | 5,1 Ω, 5 W, 5 %    | 4  |
| 12.              | Rezistor                     | 100 kΩ, 0,4 W, 1 % | 1  |

|                  |                               |                         |    |
|------------------|-------------------------------|-------------------------|----|
| 13.              | Rezistor                      | 10 $\Omega$ , 35 W, 1 % | 1  |
| 14.              | Stabilizátor napětí 78S05     | 5 V, 2 A, kladný        | 4  |
| 15.              | Stabilizátor napětí 78L09     | 9 V, 0,1 A, kladný      | 1  |
| 16.              | Napájecí adaptér síťový       | 12 V, 5400 mA           | 1  |
| 17.              | Teplovodivá pasta S-SIL.SE307 | 5 g                     | 1  |
| 18.              | Sílikonová podložka           | na pouzdro T0220        | 5  |
| 19.              | Reproterminál                 | 4 svorky                | 2  |
| 20.              | Reproterminál                 | 2 svorky                | 1  |
| 21.              | Nylonová příchytka            | 11,4 mm                 | 1  |
| 22.              | Přístrojový knoflík           | osa 6 mm                | 6  |
| 23.              | Redukce kovová                | z 4 mm na 6 mm          | 2  |
| 24.              | Izolační průchodka            | 6/3,5/3,1 mm, TO220     | 5  |
| Celkem součástek |                               |                         | 52 |

### 3.6. Upevňování LED

Předpokládá se, že většina laboratorních měření LED napájených výše popsaným zdrojem, bude prováděna v kulovém integrátoru. Jednotlivé LED jsou napájeny na kulaté plošné spoje o průměru 20 mm a tloušťce 2 mm. Při měření fotometrických veličin diod může docházet i ke krátkodobému přetížení, proto je velice důležité tyto diody chladit. K tomu použijeme již zmíněný hliníkový chladič 50 x 50 x 20 mm. Do chladiče bylo zapotřebí navrtat díry a vytvořit závit pro uchycení jednotlivých diod pomocí dvou šroubů M3. Dále bylo třeba chladič upravit pro umístění čidla teploty co nejbližší jedné z diod tak, že se ze zadní strany (strana žeber) vyfrézovala díra o průměru 6 mm, hloubce 19 mm (hloubka chladiče 20 mm) a do této díry se čidlo vsunulo. Další úpravy proběhly z hlediska uchycení celého chladiče k distanční trubici a pro vyvedení vodičů napájecích LED byl uprostřed chladiče vyvrtán otvor o průměru 6 mm.



Obr. 3.7 – Řiditelný zdroj proudu se zapojenými LED

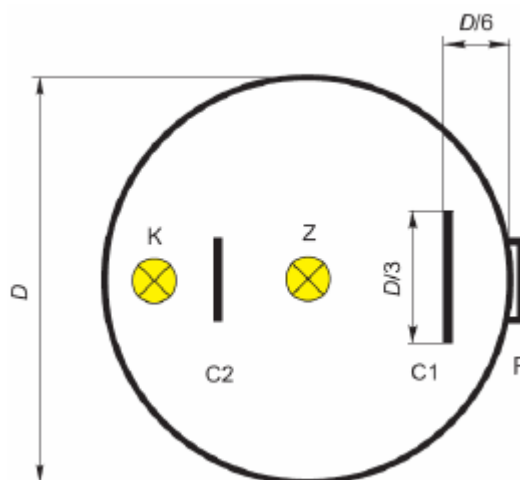
## 4. Výběr LED, výroba měřicího přípravku

Abychom mohli provést potřebná měření světelného toku, kdy nás nezajímá jeho prostorové rozložení (křivka svítivosti), ale jen úhrnné množství, musíme prakticky měřit světelný výkon, tedy svítivost, ve všech směrech vyzařování. Naměřením svítivosti v elementárním prostorovém úhlu se vytvoří elementární světelný tok. Sumací všech elementů světelného toku přes všechny směry vyzařování pak získáme úhrnný světelný tok. Je zřejmé, že měření fotometrické plochy svítivosti je dosti zdoluhavá záležitost. Integraci fotometrické plochy se lze vyhnout použitím speciálního měřicího přístroje, tzv. kulového integrátoru. [15]

Toto zařízení provádí integraci světelného toku pomocí mnohonásobných odrazů. Pro měření svítidel s velkými výkony a rozměry vlastní VŠB TU Ostrava kulový integrátor o průměru 3 metry. V tomto zařízení bychom nebyli schopni výkonové LED diody korektně změřit, proto byl zhotoven v rámci jiné diplomové práce kulový integrátor o průměru 40 centimetrů, což přesně vyhovuje našim požadavkům.

### 4.1. Kulový integrátor

Ulbrichtova koule (kulový integrátor) slouží pro měření světelného toku a osvětlenosti. Integrátor mívá nejčastěji kulový tvar, může však mít tvar krychle nebo kvádru, což není vhodné pro měření při nesymetrickém světelném toku. Světelný tok se měří pomocí normálu světelného toku a osvětlenost můžeme dopočítat z průměru kulového integrátoru a světelného toku. Jde o dutou rozebíratelnou kouli, složenou ze dvou polokoulí. Na vnitřní straně je nanесena vrstva nátěru bílé barvy s vysokým činitelem odrazu. Pro tyto účely jsou nejvhodnější běloby titanové, barytové a zinkové. Důležitá je čistota vnitřního nátěru pro udržení činitele odraznosti, ten se musí pohybovat mezi hodnotami 0,75 až 0,85. Základní vrstva je trvalá a na ni se nanáší vodou ředitelný nátěr, který se v pravidelných intervalech obnovuje. Důležitá je především neselektivnost nátěru. Uvnitř na jedné straně koule je připevněna clona, která zabraňuje přímému dopadu světla z měřeného zdroje přímo na fotočlánek, který je umístěn v otvoru ve stěně koule. Měřený zdroj je umístěn přibližně ve středu koule. Při jeho rozsvícení dochází k mnohonásobným odrazům světla od vnitřních stěn. Teoreticky je výsledná osvětlenost ve všech bodech vnitřního povrchu kulového integrátoru stejná s ohledem na difuzní charakter vnitřního nátěru. [16]



Obr. 4.1 – Náčrt kulového integrátoru [16]

Jestliže dopadá na vnitřní stranu integrátoru ze světelného zdroje  $Z$  tok  $\Phi_Z$ , a má-li rovnoměrně rozptýlně odražející povrch integrátoru integrační činitel odrazu  $\rho$ , je odražená složka výsledného světelného toku  $\Phi$  dopadající vlivem mnohonásobných odrazů na vnitřní povrch integrátoru rovna:

$$\phi = \rho\phi_z + \rho^2\phi_z + \rho^3\phi_z + \dots + \rho^n\phi_z = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \phi_z \quad (4.1)$$

Vnitřní povrch kulového integrátoru je ve všech místech stejně osvětlen a osvětlenost v libovolném bodě tečné roviny k vnitřnímu povrchu integrátoru je rovna střední hodnotě osvětlenosti celého vnitřního povrchu  $\pi D^2$  kulového integrátoru o průměru  $D$ .

V místě okénka s měřicím čidlem odpovídá osvětlenost  $E$  pouze odraženým světelným tokům, tj. toku  $\Phi$ , a stanoví se ze vztahu:

$$E = \frac{\phi}{\pi D^2} = \frac{\rho}{\pi D^2 \cdot (1-\rho)} \cdot \phi_z = k_i \cdot \phi_z \quad [lx; lm, m; m, lm; lm] \quad (4.2)$$

kde  $k_i$  je konstanta integračního fotometru, ta se vypočítá ze vztahu:

$$k_i = \frac{\rho}{\pi D^2 \cdot (1-\rho)} \quad [m^{-2}; m] \quad (4.3)$$

Fotočlánek tedy snímá hodnotu osvětlenosti  $E$ , která je přímo úměrná toku zdroje  $\Phi_Z$ . Je zřejmé, že citlivost integračního kulového fotometru ovlivňuje jeho vlastní průměr  $D$  a činitel rovnoměrně rozptýlného odrazu  $\rho$ , podle rovnice (4.2). [16]

## 4.2. Způsob měření osvětlenosti v kulovém integrátoru

Nejčastěji provádíme měření substituční objektivní metodou. Do integrátoru nejprve vložíme normál světelného toku, což je světelný zdroj s kalibrovanou hodnotou světelného toku a stanoví se konstanta zařízení. Poté se normál vypne, vyjme z integrátoru a místo něj se umístí do vnitřního prostoru koule zdroj, jehož parametry chceme měřit. Z těchto dvou naměřených údajů lze vypočítat světelný tok, kdy vynásobíme údaj na fotometru konstantou zařízení, která byla zjištěna měřením normálu.

Pokud potřebujeme měřit světelný zdroj, který nelze oddělit od konstrukčních částí svítidla, nebo s většími nosnými částmi, je nutné vložit do koule celé svítidlo. Toto způsobuje chybu měření, kdy dojde k částečnému pohlcení a odstínění světelného toku. Pro tyto případy se používá pomocný zdroj světla, tzv. korekční zdroj  $K$ . Ten vyloučí stínící vliv konstrukčních částí svítidla, je znázorněn na Obr. 4.2. Tento zdroj se umísťuje ke stěně koule na protější straně, než je výstupní otvor pro měřicí čidla. Je zakryt clonou  $C_2$ , aby nedocházelo k přímému osvětlení výstupního okénka a měřeného zdroje. Je vhodné, aby se světelný tok korekčního zdroje příliš nelišil od světelného toku měřeného zdroje a musí být konstantní po dobu jednoho měření.

Měření s korekčním zdrojem se provádí v tomto sledu:

1. při rozsvíceném normálu a zhasnutém korekčním zdroji se na přístroji odečte údaj  $E_N$ ,
2. při zhasnutém normálu a rozsvíceném korekčním zdroji odečteme údaj  $E_{kN}$ ,
3. při zhasnutém měřeném zdroji a rozsvíceném korekčním zdroji odečteme údaj  $E_{kx}$ ,
4. při rozsvíceném měřeném zdroji a zhasnutém korekčním zdroji odečteme údaj  $E_x$

Světelný tok měřeného zdroje získáme ze vztahu:

$$\phi_x = \phi_N \frac{E_x \cdot E_{kN}}{E_N \cdot E_{kx}} \quad [\text{lm}; \text{lm}, \text{lx}, \text{lx}, \text{lx}, \text{lx}] \quad (4.4)$$

Ve vztahu (4.4) je  $\phi_x$  světelný tok měřeného zdroje a poměr  $E_{kN}/E_{kx}$  představuje korekci vlivu stínění neaktivních částí.

Dříve než započneme samotné měření světelného toku musíme nechat po určitou dobu světelný zdroj zahořet, aby se ustálily jeho světelně technické parametry. Při měření normálu světelného toku (bílá, teplá LED dioda) se hodnota měřená luxmetrem ustálila asi po patnácti minutách.

Přesnost měření světelného toku v integrátoru je ovlivněna především vlastnostmi fotočlánku (závislost fotoproudu na osvětlenosti) a také změnami teploty uvnitř integrátoru během delších měření. Snížení změny teploty dosáhneme tím, že měřený světelný zdroj zahořujeme při otevřeném integrátoru a zavíráme jej pouze na samotná měření. Problémem u většiny integrátorů je udržení čistoty (vlastností) vnitřního povrchu koule. Ta se s časem mění, převážně pak ve spodní polokouli, kde dochází k usazování prachu a nečistot. Tento jev má nežádoucí vliv na neselektivnost nátěru a u dlouhodobějších měření, jako například zkouška životnosti, zkresluje měřené hodnoty. Výstupní okénko musí vyhovovat určitým požadavkům, např. umístění se má krýt co nejpřesněji s vnitřním povrchem integrátoru. Clony, které zabraňují přímému dopadu světla na fotočlánek, mají mít určité geometrické rozměry a to: clona  $C_1$  má mít průměr asi  $D/3$  a její vzdálenost od výstupního okénka má být  $D/6$ , kde  $D$  je průměr integrátoru. [16]



Obr. 4.2 – Kulový integrátor 40 cm [16]

### 4.3. Výběr LED

Pro potřeby této diplomové práce byly vybrány SMD LED od firmy CREE. Bylo vybráno celkem jedenáct různých LED. Byly vybrány z toho důvodu, že je lze napájet proudem až 1 A (červená LED pouze 700 mA). Barevné LED byly vybírány převážně podle velikosti světelného toku a bílé LED byly vybírány s různými teplotami chromatičnosti. Dále byla vybrána jedna barevná (RGBW) dioda. Tato dioda je stejně velká jako jednobarevné LED, ale obsahuje čtyři čipy: bílý, modrý, zelený a červený. Každý čip lze napájet (řídit) zvlášť. Doplnující informace je možné vyhledat na internetové adrese [17]. Základní parametry vybraných LED jsou uvedeny v Tab. 4.1.

Tab. 4.1 – základní parametry bílých LED

| Barva          | Rozsah CCT |          | Základní kód | Minimální světelný tok $\Phi$ při 350 mA* | Katalogový list |
|----------------|------------|----------|--------------|---|-----------------|
|                | min        | max      | skupina      | (lm)                                      | série           |
| Studená bílá   | 5 000 K    | 10 000 K | R2           | 114                                       | XLamp XP-E      |
| Bílá           | 2 700 K    | 2 700 K  | H1           | 100                                       | XLamp XP-E      |
| 80-CRI Bílá    | 2 600 K    | 4 300 K  | Q4           | 100                                       | XLamp XP-E      |
| Neutrální bílá | 3 700 K    | 3 700 K  | L1           | 100                                       | XLamp XP-E      |
| Studená bílá   | 5 000 K    | 8 300 K  | R4           | 130, (243, 325, 433)*                     | XLamp XP -G     |

\* Pozn.: hodnoty v závorce jsou vypočítané maximální světelné toky pro 700 mA, 1 A, 1,5 A. Vypočtené hodnoty jsou pouze orientační.

Tab. 4.2 – Základní parametry barevných LED

| Barva            | Rozsah dominantní vlnové délky $\lambda$ (nm) |     | Základní kód | Minimální světelný tok $\Phi$ při 350 mA* | Katalogový list |
|------------------|---|-----|--------------|---|-----------------|
|                  | min   | max | skupina      | (lm)                                      | série           |
| Modrá            | 465   | 485 | K2           | 30,6                                      | XLamp XP-E      |
| Zelená           | 520   | 535 | Q4           | 100                                       | XLamp XP-E      |
| Červeno oranžová | 610   | 620 | N3           | 56,8                                      | XLamp XP-E      |
| Červená          | 610   | 620 | N2           | 51,7                                      | XLamp XP-E      |

Tab. 4.3 – LED RGBW

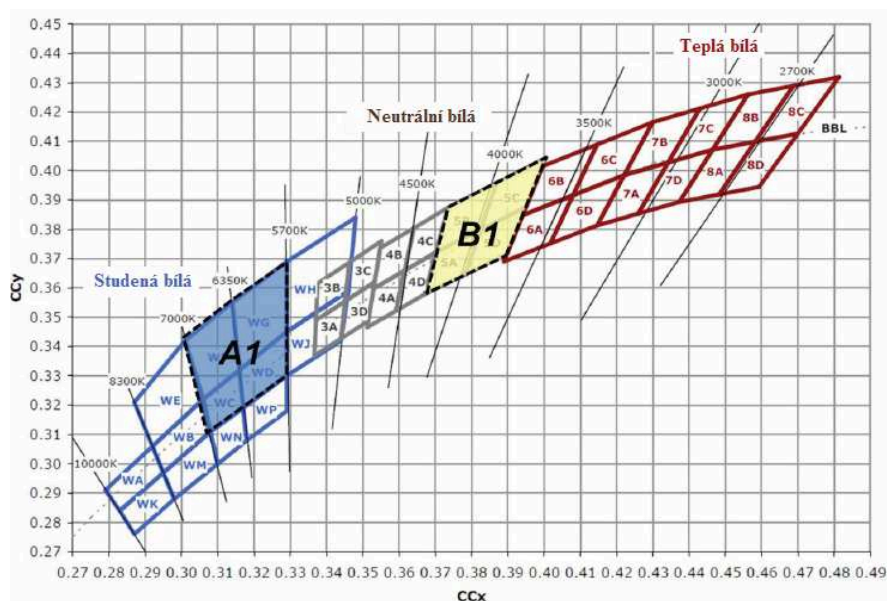
| Barva   | Minimální světelný tok $\Phi$ při 350 mA* |      | Dominantní vlnová délka $\lambda$ (nm) |                |     | Katalogový list               |
|---------|---|------|--|----------------|-----|-------------------------------|
|         | kód sady                                  | (lm) | kód sady                               | min            | max | série                         |
| Červená | A5  | 30,6 | A                                      | 620            | 630 | XLamp MC-E<br>Color<br>(RGBW) |
| Zelená  |   | 67,2 | A                                      | 520            | 535 |                               |
| Modrá   |   | 8,2  | A                                      | 450            | 465 |                               |
| Bílá**  |   | 95   | A1                                     | WG, WF, WC, WD |     |                               |

\* Pozn.: Cree udržuje toleranci  $\pm 7\%$  při měření světelného toku.

\*\* Pozn.: Rastr barevnosti pro bílé zářiče Obr. 4.3

[17]

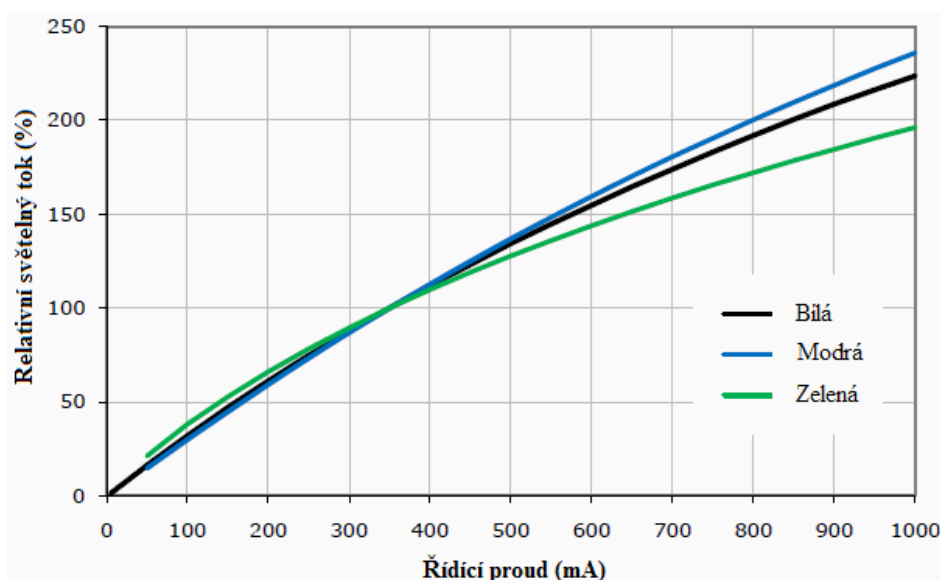




Obr. 4.3 – Rast barevnosti bílého zářiče [17]

#### 4.3.1. Světelný tok LED

Světelný tok je závislý na proudu procházejícím LED. Relativní světelný tok lze tedy řídit od 0 % až po 250 %. Závislost na řídícím proudu je takřka lineární, nejlépe je to patrné na průběhu modré LED. Z nakoupených LED má nejhorší účinnost zelená LED, která má při napájecím proudu  $I = 1000$  mA relativní světelný tok pouze necelých 200 %. Pro názornost je na Obr. 4.4 graf z katalogového listu XLamp XP-E. Tato závislost platí při teplotě  $T = 25^\circ\text{C}$ . Ostatní parametry LED jsou opět k dohledání na internetové adrese [17].



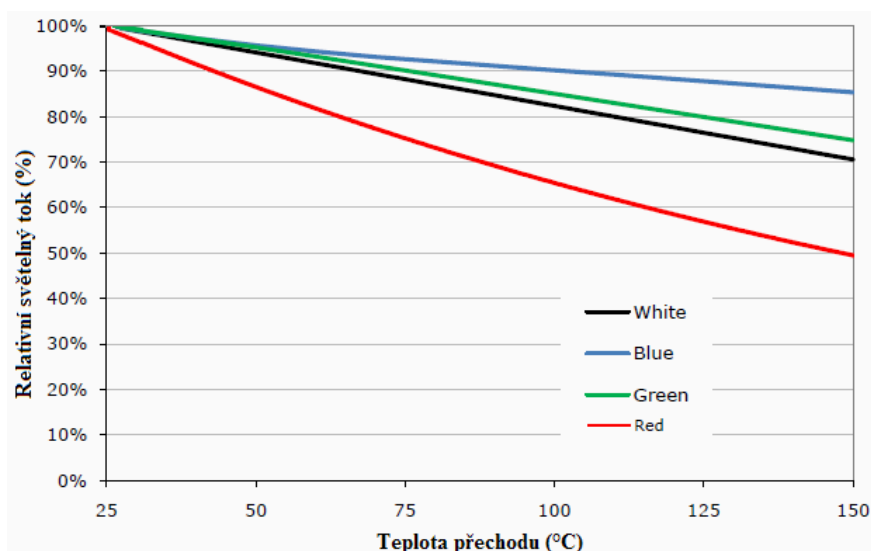
Obr. 4.4 – Závislost světelného toku na napájecím proudu [17]



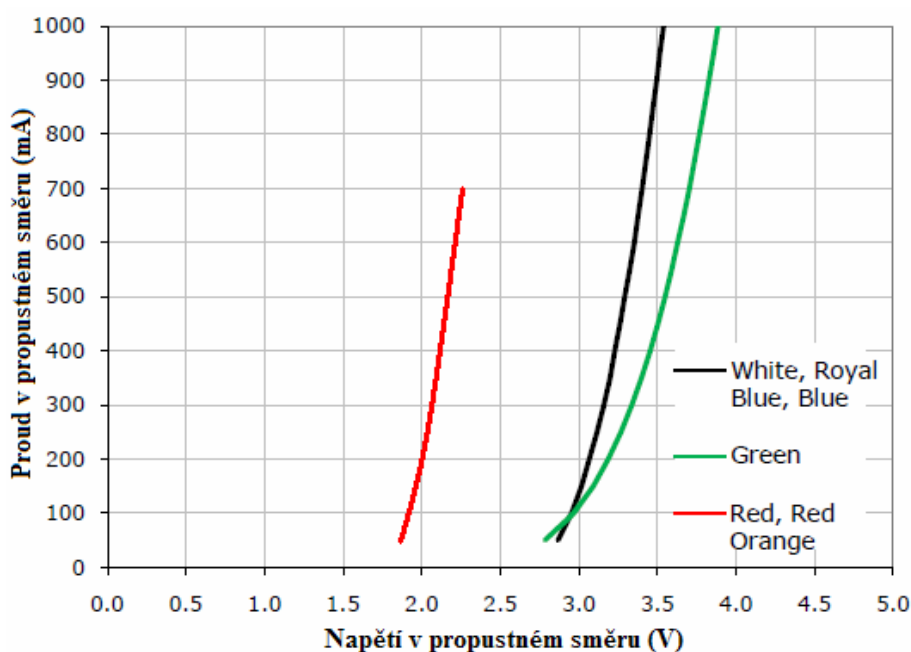
### 4.3.1.1. Teplotní závislost světelného toku, VA charakteristika

Použité LED je možno provozovat až do teploty PN přechodu 150 °C. S rostoucí teplotou se jejich účinnost snižuje. Nejméně je teplotně závislá modrá LED a největší závislost na teplotě má dioda červená, kdy při  $T = 150\text{ °C}$  klesne světelný tok až na 50 %. Tyto křivky platí pro napájecí proud  $I_F = 350\text{ mA}$ .

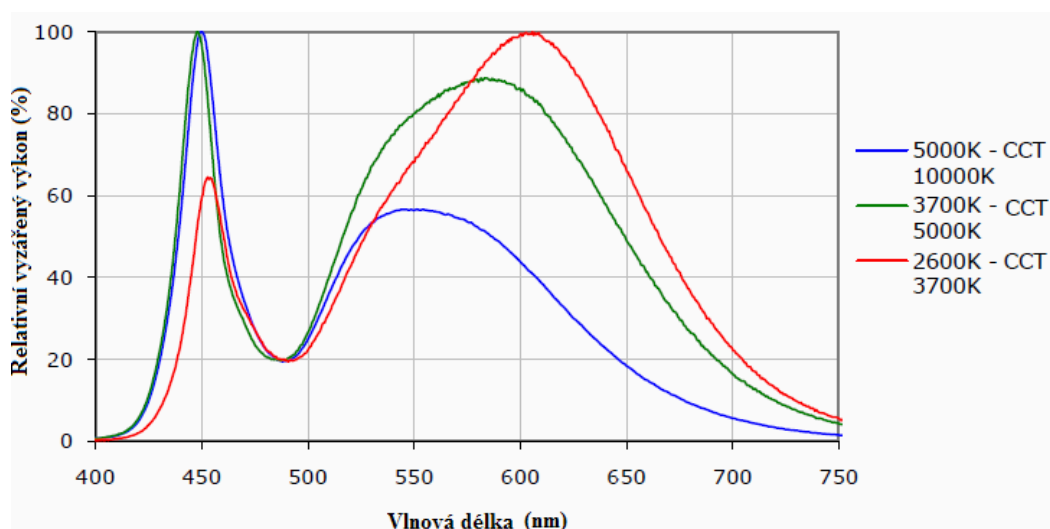
Na dalších základní závislostí použitých LED. Ostatní parametry viz [17]



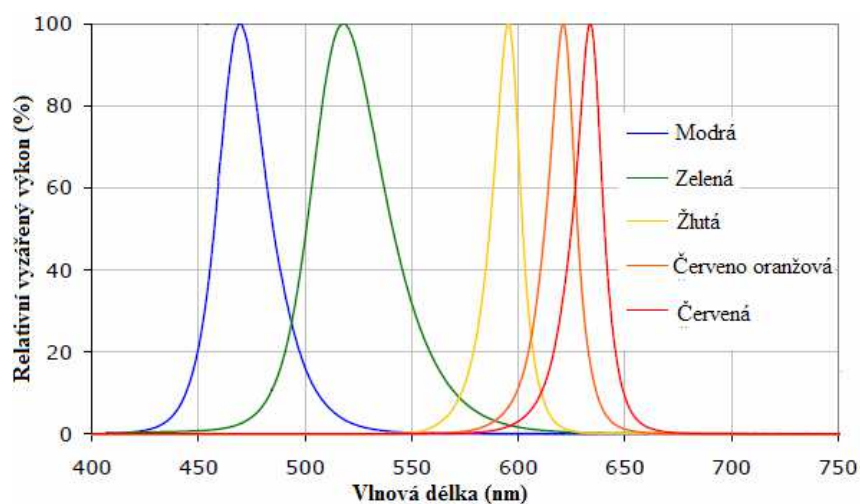
Obr. 4.5 – Teplotní závislost světelného toku použitých LED [17]



Obr. 4.6 – Voltampérová charakteristika měřených LED [17]



Obr. 4.7 – Spektrum vlnových délek vyzařovaných bílými LED s různými teplotami chromatičnosti



Obr. 4.8 – Spektrum vlnových délek vyzařovaných barevnými LED

[21]

## 5. Rozbor výsledků měření

Měření probíhalo 27. 4. 2012 v laboratoři 02 v areálu školy VŠB TU Ostrava v budově „L“. Veškerá měření byla prováděna v kulovém integrátoru.

Prováděná měření:

- Měření kolorimetrických souřadnic  $x$ ,  $y$ , (kolorimetrický trojúhelník), indexu podání barev, teploty chromatičnosti
- Měření spektrálních charakteristik
- Měření osvětlenosti – výpočet světelného toku.

Do malého kulového integrátoru byly umístěny čtyři vybrané LED pro měření výše uvedených veličin. Postupně byly měřeny tyto LED:

- Neutrální Bílá: L1,  $\Phi = 100 \text{ lm}$ , CCT = 3500 K
- Modrá: K2,  $\Phi = 30,6 \text{ lm}$
- Zelená: Q4,  $\Phi = 100 \text{ lm}$
- Červená: N2,  $\Phi = 51,7 \text{ lm}$ .

Hodnoty světelného toku uvádí výrobce při 100 % proudu, což je 350 mA.

Umístění a nasměrování chladiče s LED v integrátoru je znázorněno na Obr. 5.1. Hliníkový chladič byl připevněn kolmo k distanční trubici pomocí dvou samořezných šroubů, přichycených mezi žebra chladiče.



Obr. 5.1 – Umístění a nasměrování chladiče s LED

## 5.1. Měření fotometrických veličin

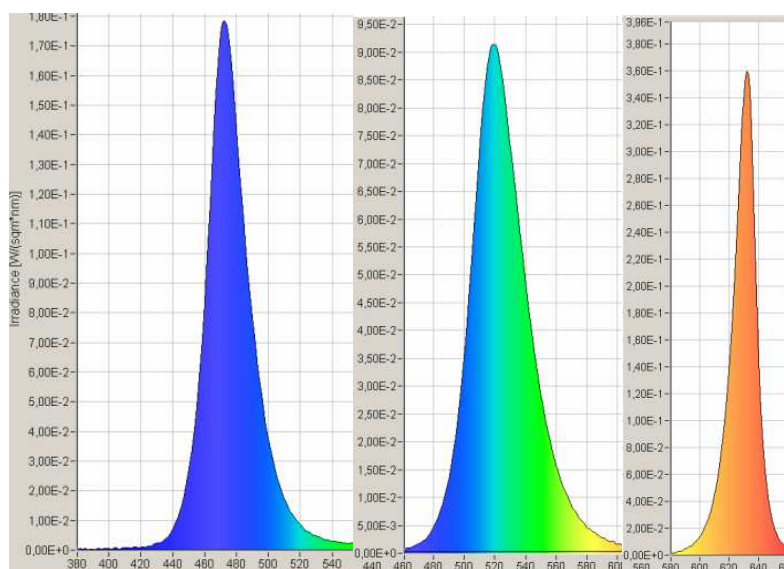
Měření probíhalo pomocí *Spektroradiometru Jeti Specbos 1211*. Tímto přístrojem byly naměřeny všechny potřebné veličiny. Měřicí přístroj se připevnil k otvoru na vrcholu koule a byl zde pro větší přesnost ponechán celou dobu i při výměně normálového zdroje za měřené LED.

## 5.2. Měření základních parametrů LED

Diody umístěné v Ulbrichtově kouli a připojené k říditelnému zdroji proudu byly postupně zapínány každá zvlášť, aby bylo možné změřit parametry viz. Tab. 5.1. Veškerá měření probíhala při teplotě 30 °C naměřené teploměrem s čidlem umístěným v chladíči za LED. Spektra použitých LED jsou na Obr. 5.2 a Obr. 5.3.

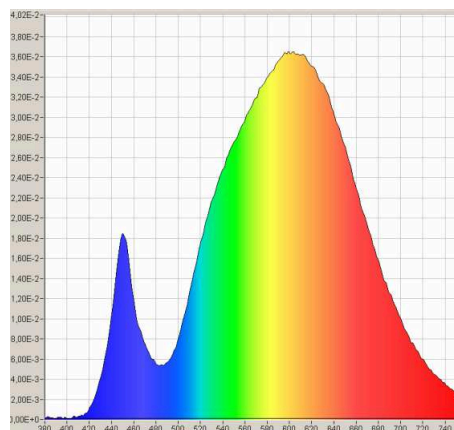
Tab. 5.1 – Parametry měřených LED

| barva   | $\lambda_{\text{dom}}$ | Max. $\Phi$ | $\Phi$ při 350 mA | CRI   | Barevná čistota | CCT  |
|---------|------------------------|-------------|-------------------|-------|-----------------|------|
|         | [nm]                   | [lm]        | [lm]              | [-]   | [%]             | [K]  |
| Bílá    | 581,8                  | 201,36      | 100,43            | 79,64 | 56,3            | 3009 |
| Červená | 622,8                  | 160,86      | 73,55             | -     | 99,3            | -    |
| Zelená  | 527,6                  | 173,57      | 100,12            | -     | 76,4            | -    |
| Modrá   | 477,3                  | 73,29       | 35,38             | -     | 90,2            | -    |



Obr. 5.2 – Spektra RGB LED

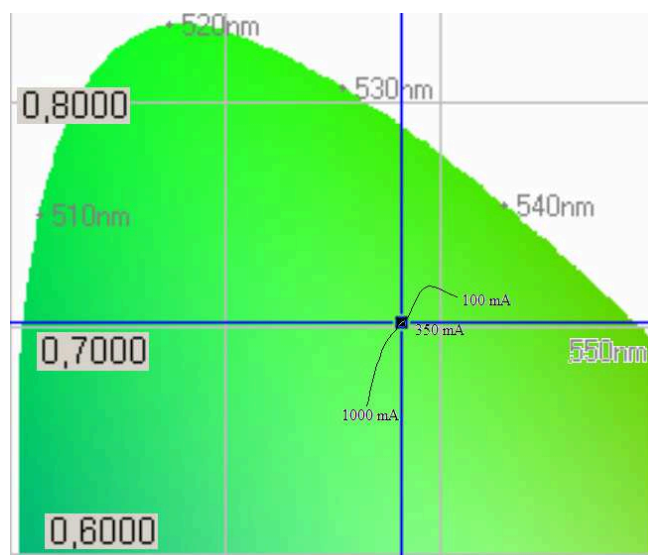
Z naměřených hodnot lze vyčíst, že světelný tok  $\Phi$  při  $I_F = 350$  mA bílé a zelené LED se takřka neliší od udávaných hodnot výrobce viz Tab. 4.1 a Tab. 4.2, kdežto u modré LED byl naměřený tok  $\Phi$  o 4,78 lm větší a u červené LED byl naměřený tok  $\Phi$  až o 21,85 lm větší. Měrný výkon  $\eta$ , elektrický výkon  $P$  a další parametry jsou uvedeny v následujících tabulkách.



Obr. 5.3 – Spektrum bílé LED L1

### 5.2.1. Měření závislosti toku $\Phi$ na proudu $I_F$

Toto měření bylo prováděno opět pomocí *Spektroradiometru Jeti Specbos 1211*. Pro každou LED bylo naměřeno 10 hodnot. Nejprve se zapnula červená dioda a nastavila se otočným potenciometrem hodnota 100 mA. Po nastavení se odečetla hodnota napětí z voltmetru zabudovaného ve zdroji. Dále pak bylo provedeno samotné měření pomocí spektrofotometru a programu JETI, který zpracovává spektrální charakteristiky a slouží *Spektroradiometru Jeti Specbos 1211* jako softwarové rozhraní. Je samozřejmostí, že světelný tok výkonových LED nelze v kulovém integrátoru měřit přímo, bylo tedy zapotřebí snímat také osvětlenost  $E$ . Tuto veličinu spektrofotometr zaznamenával automaticky při každém měření. Pro výpočet světelného toku musí být provedeno měření osvětlenosti podle Odst.4.2. podle metody světelného normálu a korekční žárovky. Světelný tok se pak vypočítá podle vzorce (5.1)



Obr. 5.4 – Posun trichromatických souřadnic zelené LED při změně proudu

Dále pak byly zaznamenávány souřadnice  $x'$  a  $y'$  souřadnicového systému CIE 1931 pro možnost sledování posunu bodu barevnosti při změně napájecího proudu. Nevětší posun byl zaznamenán u zelené LED, posun bodu vyzařování v trichromatickém trojúhelníku je znázorněn na Obr. 5.4 (výchozí bod – souřadnice při  $I_F = 350$  mA). Je zde patrné posouvání směrem ke středu trojúhelníku při

zvyšujícím se proudu, což má za následek snižování sytosti barvy. Bílá a modrá LED jsou v příloze G a H, červená LED má tak malou změnu trichromatických souřadnic, proto nebyl zhotoven obrázek. V praxi jsme si ověřili, že posun souřadnic bílé LED opravdu souhlasí s teorií. Při porovnání Obr. 2.13 bílé LED a vlastních naměřených hodnot znázorněných v příloze G, je patrný stejný směr posunu souřadnic v trichromatickém trojúhelníku při změně proudu. Lze si povšimnout (příloha H), že největší změna souřadnic nastává při nižších proudech. Teplota chromatičnosti se s proudem zvyšuje viz příloha B. Dále byl dopočítán výkon  $P$  (W), měrný výkon  $\eta$  (lm/W).

Tab. 5.2 – posun trichromatických souřadnic při změně proudu červené LED

| I (mA) | 100    | 200    | 300    | 350    | 400    | 500    | 600    | 700    | 800    | 900    | 1000   |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| x (-)  | 0,6933 | 0,6933 | 0,6943 | 0,6945 | 0,6944 | 0,6947 | 0,6961 | 0,696  | 0,6961 | 0,6973 | 0,6977 |
| y (-)  | 0,305  | 0,3047 | 0,304  | 0,3039 | 0,3035 | 0,3032 | 0,3026 | 0,3012 | 0,3009 | 0,301  | 0,3003 |

Tab. 5.3 – změna parametrů při změně proudu – červená LED

| I (mA)        | 100    | 200   | 300   | 350   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  |
|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| U (V)         | 1,915  | 2,03  | 2,13  | 2,18  | 2,22  | 2,29  | 2,36  | 2,42  | 2,48  | 2,54  | 2,58  |
| E (lx)        | 433    | 861   | 1258  | 1453  | 1638  | 1980  | 2324  | 2592  | 2855  | 3045  | 3178  |
| P (W)         | 0,1915 | 0,406 | 0,639 | 0,763 | 0,888 | 1,145 | 1,416 | 1,694 | 1,984 | 2,286 | 2,58  |
| $\Phi_x$ (lm) | 21,9   | 43,6  | 63,7  | 73,5  | 82,9  | 100,2 | 117,6 | 131,2 | 144,5 | 154,1 | 160,9 |
| $\eta$ (lm/W) | 114,5  | 107,3 | 99,7  | 96,4  | 93,4  | 87,5  | 83,1  | 77,5  | 72,8  | 67,4  | 62,4  |

### Příklad výpočtu:

- Světelný tok  $\Phi$ : naměřené hodnoty osvětlenosti
  - osvětlenost normálu  $E_N = 1892$  lx, světelný tok  $\Phi = 85,8$  lm, korekční svítidlo  $E_{KN} = 739,7$  lx,  $E_{KX} = 662,7$  lm (jako normálový zdroj byla použita kalibrovaná LED tepa bílá,  $I_F = 350$  mA,  $U = 3,4$  V)

$$\phi_x = \phi_N \frac{E_x \cdot E_{KN}}{E_N \cdot E_{KX}} = 85,8 \frac{1453 \cdot 739,7}{1892 \cdot 662,7} = 73,5 \text{ lm} \quad (5.1)$$

$$\text{- Výkon LED } P: \quad P = \frac{U \cdot I_F}{1000} = \frac{2,18 \cdot 350}{1000} = 0,763 \text{ W} \quad (5.2)$$

$$\text{- Měrný výkon } \eta: \quad \eta = \frac{\Phi}{P} = \frac{73,5}{0,763} = 96,4 \text{ lm/W} \quad (5.3)$$

Tab. 5.4 – posun trichromatických souřadnic při změně proudu zelené LED

| I (mA) | 100    | 200    | 300    | 350    | 400    | 500    | 600    | 700    | 800    | 900    | 1000   |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| x (-)  | 0,2084 | 0,1943 | 0,1858 | 0,1825 | 0,1798 | 0,1749 | 0,1723 | 0,17   | 0,1682 | 0,1673 | 0,1661 |
| y (-)  | 0,7153 | 0,7199 | 0,7062 | 0,7031 | 0,6996 | 0,6928 | 0,6866 | 0,6797 | 0,6725 | 0,6669 | 0,6633 |

Tab. 5.5 - změna parametrů při změně proudu – zelená LED

| I (mA)        | 100   | 200   | 300   | 350    | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  |
|---------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| U (V)         | 2,95  | 3,11  | 3,22  | 3,27   | 3,31  | 3,39  | 3,44  | 3,5   | 3,54  | 3,58  | 3,62  |
| E (lx)        | 818   | 1370  | 1790  | 1978   | 2143  | 2474  | 2718  | 2945  | 3164  | 3301  | 3429  |
| P (W)         | 0,295 | 0,622 | 0,966 | 1,1445 | 1,324 | 1,695 | 2,064 | 2,45  | 2,832 | 3,222 | 3,62  |
| $\Phi_x$ (lm) | 41,4  | 69,3  | 90,6  | 100,1  | 108,5 | 125,2 | 137,6 | 149,1 | 160,2 | 167,1 | 173,6 |
| $\eta$ (lm/W) | 140,4 | 111,5 | 93,8  | 87,5   | 81,9  | 73,9  | 66,7  | 60,8  | 56,6  | 51,9  | 47,9  |

Tab. 5.6 – posun trichromatických souřadnic při změně proudu modré LED

| I (mA) | 100    | 200    | 300    | 350    | 400    | 500    | 600    | 700    | 800    | 900    | 1000   |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| x (-)  | 0,1165 | 0,1209 | 0,1232 | 0,1239 | 0,1247 | 0,1261 | 0,1271 | 0,1281 | 0,1287 | 0,1291 | 0,1296 |
| y (-)  | 0,1512 | 0,1381 | 0,131  | 0,128  | 0,1258 | 0,1219 | 0,1191 | 0,1169 | 0,115  | 0,1141 | 0,1136 |

Tab. 5.7 – změna parametrů při změně proudu – modrá LED

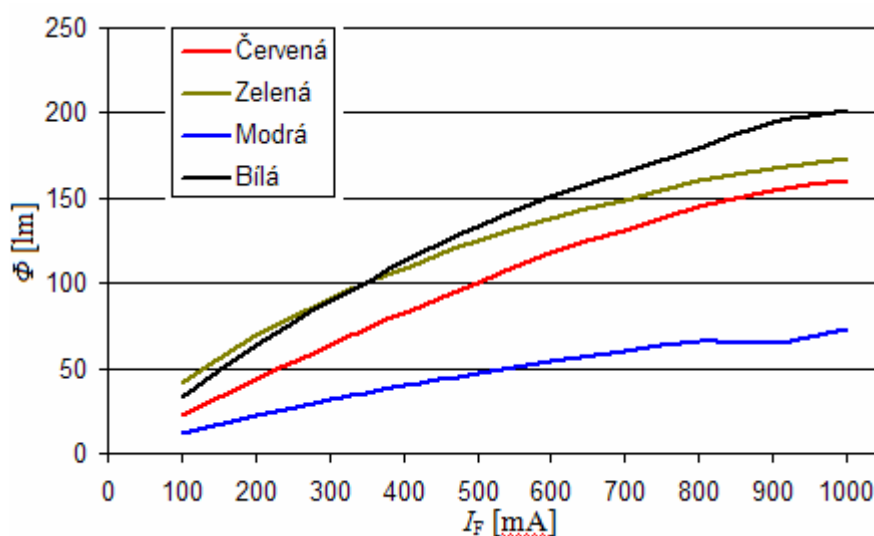
| I (mA)        | 100   | 200   | 300   | 350    | 400   | 500  | 600   | 700   | 800  | 900   | 1000 |
|---------------|-------|-------|-------|--------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|
| U (V)         | 2,78  | 2,88  | 2,96  | 2,99   | 3,02  | 3,08 | 3,13  | 3,17  | 3,2  | 3,23  | 3,25 |
| E (lx)        | 233   | 443   | 619   | 699    | 783   | 941  | 1063  | 1183  | 1297 | 1279  | 1448 |
| P (W)         | 0,278 | 0,576 | 0,888 | 1,0465 | 1,208 | 1,54 | 1,878 | 2,219 | 2,56 | 2,907 | 3,25 |
| $\Phi_x$ (lm) | 11,8  | 22,4  | 31,3  | 35,4   | 39,6  | 47,6 | 53,8  | 59,9  | 65,7 | 64,7  | 73,3 |
| $\eta$ (lm/W) | 42,4  | 38,9  | 35,3  | 33,8   | 32,8  | 30,9 | 28,7  | 27    | 25,6 | 22,3  | 22,6 |

Tab. 5.8 – posun trichromatických souřadnic při změně proudu bílé LED

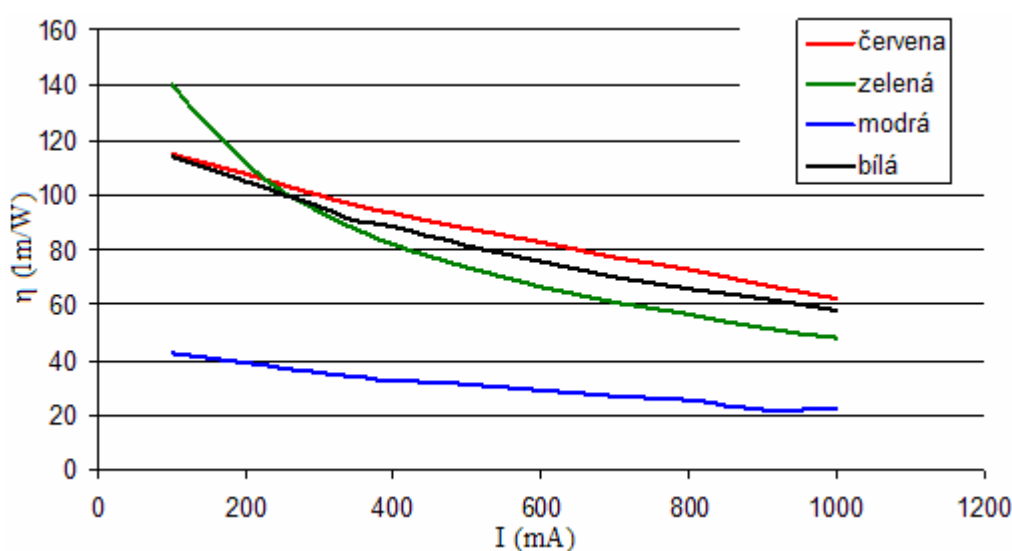
| I (mA) | 100    | 200    | 300    | 350    | 400    | 500    | 600    | 700    | 800    | 900    | 1000   |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| x (-)  | 0,4429 | 0,4417 | 0,4405 | 0,4402 | 0,4399 | 0,439  | 0,4385 | 0,438  | 0,4375 | 0,4368 | 0,4367 |
| y (-)  | 0,4173 | 0,4151 | 0,4133 | 0,4129 | 0,412  | 0,4109 | 0,4098 | 0,4089 | 0,4082 | 0,4071 | 0,4067 |

Tab. 5.9 změna parametrů při změně proudu – bílá LED

|               | Bílá  |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| I (mA)        | 100   | 200   | 300   | 350    | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  |
| U (V)         | 2,9   | 3,03  | 3,13  | 3,17   | 3,2   | 3,27  | 3,32  | 3,36  | 3,41  | 3,46  | 3,48  |
| E (lx)        | 654   | 1253  | 1774  | 1984   | 2234  | 2634  | 2979  | 3256  | 3532  | 3846  | 3978  |
| CCCT (°C)     | 3011  | 3011  | 3015  | 3016   | 3013  | 3020  | 3019  | 3019  | 3020  | 3024  | 3023  |
| P (W)         | 0,29  | 0,606 | 0,939 | 1,1095 | 1,28  | 1,635 | 1,992 | 2,352 | 2,728 | 3,114 | 3,48  |
| $\Phi_x$ (lm) | 33,1  | 63,4  | 89,8  | 100,4  | 113,1 | 133,3 | 150,8 | 164,8 | 178,8 | 194,7 | 201,4 |
| $\eta$ (lm/W) | 114,2 | 104,7 | 95,6  | 90,5   | 88,3  | 81,5  | 75,7  | 70,1  | 65,5  | 62,5  | 57,9  |



Obr. 5.2 – Závislost světelného toku na změně proudu



Obr. 5.3 – Závislost měrného výkonu se změnou proudu

### 5.3. Vyhodnocení

Z naměřených hodnot a zhotovených grafů je patrné, že měrný výkon klesá u všech LED s rostoucím proudem. Největší pokles lze na Obr. 5.3 pozorovat u zelené LED, kdy měrný výkon klesá strmě od hodnoty 100 mA přibližně až po 350 mA a dále je pokles pozvolnější. Nejméně závislý měrný výkon na proudu má modrá LED, ale zase se pohybuje zhruba v jedné třetině měrných výkonů ostatních LED. Vyhodnocované parametry jsou částečně zkreslovány, protože napětí na diodách není snímáno přímo na jejich kontaktech, ale z technických důvodů je snímáno na výstupech ze zdroje. Toto způsobuje nepřesnost měření kvůli úbytku napětí vznikajícímu na přívodním vedení k LED. Úbytek napětí se pohybuje v řádech mV. To znamená, že ve skutečnosti je měrný výkon nepatrně větší, protože dioda pracuje s nižším napětím, tudíž i výkonem. Ke snížení úbytku napětí by samozřejmě pomohlo zvětšení průřezu vodičů z 0,35 mm<sup>2</sup> na 0,5 mm<sup>2</sup>, to ovšem není možné v případě, kdy se měří v kulovém integrátoru. Osm vodičů pro LED a jeden pro teploměr by nebylo možné protáhnout distanční trubicí.



Lze si tedy pro zpřesnění měření přímo změřit napětí na diodách při potřebném nastavení kalibrovaným multimetrem, nebo lze úbytek napětí dopočítat podle vzorce (5.4) a tento úbytek odečíst od naměřené hodnoty na voltmetru zdroje, čímž dostaneme napětí přímo na diodě.

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{S} \cdot I_F \quad (\text{V}) \quad (5.4)$$

$\Delta U$  – úbytek napětí na vedení pro stejnosměrný proud (V)

$S$  – průřez použitého vodiče ( $\text{mm}^2$ )

$l$  – délka vodiče [m]

$\rho$  – měrná rezistivita ( $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ )

## 5.4. Mísení RGB a bílých LED

Výše uvedené LED byly použity pro míchání bílého světla. Zajímala nás především velikost dosaženého indexu podání barev a teplota chromatičnosti. Nejprve byly použity pouze RGB diody, bez bílé LED.

### 5.4.1. Simulace v programu LightTools

Ve dnech 10.4.2012 až 12.4.2012 mi byla umožněna návštěva slovenské firmy *OMS spol. s r.o.*, která se zabývá výrobou a vývojem svítidel. V oblasti výroby svítidel s LED zdroji má tato firma bohaté zkušenosti. Pomocí programu LightTools, který tato firma využívá pro různé aplikace, např. pro vývoj a výpočet parametrů reflektorů Odrazných ploch, jsme byli schopni zjistit přesné nastavení jednotlivých LED pro získání různých parametrů (teploty chromatičnosti a indexu podání barev). Jako vstupy byla použita data z katalogu výrobce. Jelikož jsou tyto informace z hlediska vyzářeného spektra LED nedostačující, bylo toto spektrum obkresleno z obrázku v katalogovém listu jednotlivých LED. Absenci těchto informací řeší firma vlastním změřením parametrů LED, čímž také získá přesnější a reálnější data.

Po zadání parametrů LED (světelný tok, vyzářené spektrum, teplota chromatičnosti u bílých LED) se nastavily požadované hodnoty CRI. Program vypočetl světelný tok jednotlivých LED, CCT a další parametry.

- diody použité pro výpočet v programu LightTools – výsledné nastavení

Tab. 5.10 – výsledné nastavení LED pro CRI = 85

| LED A5 bez bílého čipu |          |                       |                |                 |                 |
|------------------------|----------|-----------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Barva                  | kód sady | vypočtený $\Phi$ (lm) | zadané CRI (-) | získané CRI (-) | získaná CCT (K) |
| Bílá                   | A5       | -                     | -              | -               | -               |
| Červená                |          | 6,9                   | 85             | 77              | 12216           |
| Zelená                 |          | 40,6                  |                |                 |                 |
| Modrá                  |          | 2,05                  |                |                 |                 |

Tab. 5.11 – výsledné nastavení LED pro CRI = 95

| LED A5 – všechny čipy |          |                       |                |                 |                 |
|-----------------------|----------|-----------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| barva                 | kód sady | vypočtený $\Phi$ (lm) | zadané CRI (-) | získané CRI (-) | získaná CCT (K) |
| Bílá                  | A5       | 179,55                | 95             | 90              | 5730            |
| Červená               |          | 6,9                   |                |                 |                 |
| Zelená                |          | 40,6                  |                |                 |                 |
| Modrá                 |          | 0,7                   |                |                 |                 |

Tab. 5.12 – výsledné nastavení RGB LED

| RGB LED |         |                       |                |                 |                 |
|---------|---------|-----------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Barva   | skupina | vypočtený $\Phi$ (lm) | zadané CRI (-) | získané CRI (-) | získaná CCT (K) |
| Červená | N2      | 31,6                  | 85             | 69              | 8368            |
| Zelená  | Q4      | 156                   |                |                 |                 |
| Modrá   | K2      | 17                    |                |                 |                 |

Z vypočtených hodnot je patrné, že lze vytvořit bílé světlo pomocí RGB LED, ale při snaze získat CRI nad 80 je to s danými diodami takřka nemožné. V Tab. 5.10 se CRI sice blíží 80, ale CCT je příliš vysoká. Toto může být ovlivněno použitím červeného čipu s vlnovou délkou v rozmezí 620 až 630 nm. Pokud by byla použita červená LED s vyšší vlnovou délkou, tedy více červená dioda, CCT by se částečně snížila. Vyzařované spektrum je na obrázku (příloha A). Zajímavé je, že největší podíl světelného toku tvoří při mísení RGB vždy zelená barva. Modré je naopak zapotřebí velice málo (z hlediska CRI), tento jev je způsoben tím, že oko má největší spektrální citlivost v oblasti 555 nm, tudíž není zapotřebí větších vyzářených výkonů v oblasti krátkých vlnových délek, ale je nutné mít větší část vyzářené energie v oblasti zelené vlnové délky.

V Tab. 5.11 je použito k výpočtu všech čtyř čipů. Je zde patrné, že bílý čip tvoří základ celého světla a ostatní barvy slouží pouze k zlepšení CRI. Podařilo se dosáhnout velmi dobrého CRI a teplota chromatičnosti se blíží k CCT denního světla. Opět zelený čip vyzařuje několikanásobně více než ostatní barvy. Modrá je takřka na nulové hodnotě, což bylo možné předvídat, protože bílá LED je modrý čip s konvertorem vlnových délek, sama tedy vyzařuje světlo v těchto vlnových délkách. Tyto skutečnosti jsem si ověřil vlastním měřením v laboratoři VŠB TU Ostrava.

### Ověřování vypočtených parametrů LED

Zdroj vytvořený pro tyto účely nestmívá až do nuly světelného toku, ale pouze zhruba do 25 % toku (bráno podle Obr. 5.2 kdy 100 % toku je vyzářeno při 350 mA). Tímto bylo znemožněno nastavit vypočtené hodnoty programem LightTools. Tento problém jsme vyřešili nastavením vyšších hodnot světelného toku, ale zachovali jsme vypočtený poměr toků jednotlivých LED. Další nastavování LED probíhalo podle získaných výsledků z programu Jeti. Tento program vypočítává teplotu chromatičnosti s porovnáním se standardními zářiči A, B, C danými normou, kdy standardní osvětlovací zdroj A je ráno jako Planckův zářič. Pro správné určení CCT je zapotřebí vybrat, s čím bude program měřený zdroj porovnávat. V tabulkách 5.13 až 5.17 jsou zpracovány výsledky měření při míchání bílého světla.

Tab. 5.13 - Výsledné hodnoty podle nastavení Tab. 5.10

| mísení RGB - Planckův zářič |     |      |      |       |      |        |        |      |                        |        |        |
|-----------------------------|-----|------|------|-------|------|--------|--------|------|------------------------|--------|--------|
| barva                       | I   | U    | E    | CRI   | CCT  | $\Phi$ | $\eta$ | P    | $\lambda_{\text{dom}}$ | x      | Y      |
|                             | (A) | (V)  | (lx) | (-)   | (°C) | (lm)   | (lm/W) | (W)  | (nm)                   | (-)    | (-)    |
| Červená                     | 279 | 2,1  | 3316 | 20,93 | 3904 | 167,85 | 82,9   | 2,02 | 579                    | 0,3846 | 0,3843 |
| Zelená                      | 316 | 3,21 |      |       |      |        |        |      |                        |        |        |
| Modrá                       | 150 | 2,83 |      |       |      |        |        |      |                        |        |        |

Tab. 5.14 – Výsledné hodnoty podle nastavení Tab. 5.12

| mísení RGB – standardní zářič B |     |      |      |       |      |        |        |      |                        |        |        |
|---------------------------------|-----|------|------|-------|------|--------|--------|------|------------------------|--------|--------|
| barva                           | I   | U    | E    | CRI   | CCT  | $\Phi$ | $\eta$ | P    | $\lambda_{\text{dom}}$ | x      | Y      |
|                                 | (A) | (V)  | (lx) | (-)   | (°C) | (lm)   | (lm/W) | (W)  | (nm)                   | (-)    | (-)    |
| Červená                         | 200 | 2,01 | 4140 | 66,34 | -    | 209,56 | 58,9   | 3,56 | 530                    | 0,2997 | 0,2998 |
| Zelená                          | 710 | 3,49 |      |       |      |        |        |      |                        |        |        |
| Modrá                           | 175 | 3,86 |      |       |      |        |        |      |                        |        |        |

Tab. 5.15 – Výsledné hodnoty podle nastavení Tab. 5.11

| mísení WRG - Planckův zářič |     |      |      |       |      |        |        |      |                        |        |       |
|-----------------------------|-----|------|------|-------|------|--------|--------|------|------------------------|--------|-------|
| barva                       | I   | U    | E    | CRI   | CCT  | $\Phi$ | $\eta$ | P    | $\lambda_{\text{dom}}$ | x      | Y     |
|                             | (A) | (V)  | (lx) | (-)   | (°C) | (lm)   | (lm/W) | (W)  | (nm)                   | (-)    | (-)   |
| Bílá                        | 977 | 3,49 | 5241 | 92,94 | 3036 | 265,29 | 68,7   | 3,86 | 581                    | 0,4447 | 0,424 |
| Červená                     | 94  | 2,93 |      |       |      |        |        |      |                        |        |       |
| Zelená                      | 94  | 1,9  |      |       |      |        |        |      |                        |        |       |

Tab. 5.16 – Výsledné hodnoty podle nastavení Tab. 5.11 (+ modrá LED)

| mísení WRGB - Planckův zářič |     |      |      |       |      |        |        |      |                        |        |        |
|------------------------------|-----|------|------|-------|------|--------|--------|------|------------------------|--------|--------|
| barva                        | I   | U    | E    | $R_a$ | CCT  | $\Phi$ | $\eta$ | P    | $\lambda_{\text{dom}}$ | x      | Y      |
|                              | (A) | (V)  | (lx) | (-)   | (°C) | (lm)   | (lm/W) | (W)  | (nm)                   | (-)    | (-)    |
| Bílá                         | 977 | 3,49 | 5317 | 94,04 | 3445 | 269,14 | 65,3   | 4,12 | 581                    | 0,4087 | 0,3949 |
| Červená                      | 94  | 2,93 |      |       |      |        |        |      |                        |        |        |
| Zelená                       | 94  | 1,9  |      |       |      |        |        |      |                        |        |        |
| Modrá                        | 94  | 2,76 |      |       |      |        |        |      |                        |        |        |

#### 5.4.2. Vyhodnocení získávání bílého světla

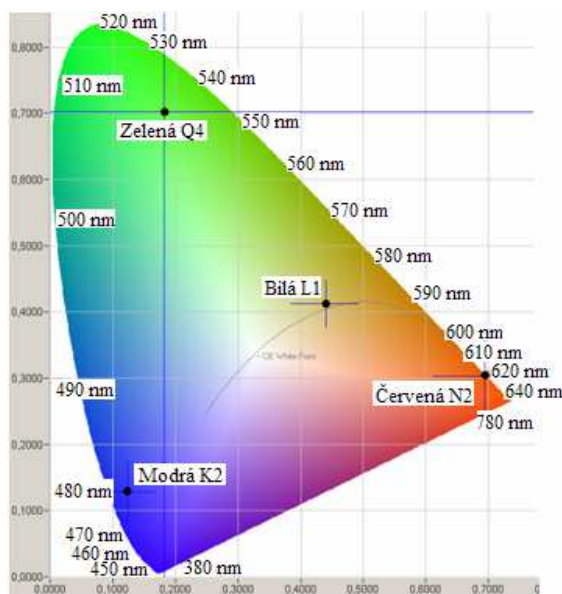
Grafy se spektrální charakteristikou a trichromatickým trojúhelníkem jednotlivých LED jsou přiloženy v příloze C, D, E, F. V Tab. 5.13 je vidět značná odlišnost naměřených hodnot od hodnot vypočtených, toto může být způsobeno nepřesným zadáním spekter barev do programu LightTools, chybou měření a také tím, že nebyly nastaveny vypočtené hodnoty toků, ale pouze byl dodržen poměr mezi toky barev, což může způsobit velké rozdíly. Byl vypočten největší měrný výkon ze všech čtyř měření. CRI je velmi malé, program JETI využívá pro výpočet CRI 15 barevných vzorků které porovnává se spektrem

měřeného zdroje. Vyhodnocuje je každý zvlášť a po té z nich váženým průměrem vypočítá výsledné CRI.

V Tab. 5.14 je již hodnota CRI blíže vypočtené hodnotě, ale CCT nebylo vypočítáno, protože bod vyzařování v trichromatickém trojúhelníku se nachází mimo čáru teplotních zářičů (příloha B). S těmito diodami nelze dosáhnout vyššího CRI, protože mají úzká spektra vyzařování. Pro dokonalejší výsledky by bylo zapotřebí mít LED se širšími spektry.

V Tab. 5.15 jsou vypočtené hodnoty nastaveny pouze přibližně, ale přesto jsme dosáhli dosti dobrých výsledků. Toto nastavení se jeví jako neoptimálnější v rámci možností regulace, které jsme měli. Kvalita bílého světla je dostačující a světelný tok  $\Phi = 68,7$  lm je při těchto parametrech největší, jaký jsme dosáhli.

V Tab. 5.16 je CRI ještě o něco lepší díky připojení modré LED, ale je tím zvýšen odebíraný výkon a tudíž se snížil i měrný výkon. Je třeba si ovšem uvědomit, že měrné výkony nezahrnují předřadníky LED, ale pouze jejich vlastní spotřebu. Na Obr. 5.4 jsou vyznačeny souřadnice použitých LED v trichromatickém trojúhelníku.



Obr. 5.4 – Rozmístění LED v trichr. Trojúhelníku při  $I_F = 350$  mA.

## Závěr

Tato diplomová práce je zaměřena na změnu barevnosti LED při jejich stmívání, získávání bílého světla pomocí barevných a bílých LED.

Pro tyto účely bylo zapotřebí vyrobit říditelný zdroj proudu. Jeho navržení a sestavení jsem popsal v třetí kapitole. Tento přístroj je zhotoven z polotovarů. Rozmístění a vyřezání otvorů pro umístění měřidel, ovládacích prvků, vstupních a výstupních svorek jsem rozvrhl dle svého uvážení, pokud možno co nejpřehledněji a tak aby vše bylo možno obsluhovat bez potíží. V tomto stylu jsem zhotovil i vnitřní zapojení přístroje. Ten je snadno rozebratelný a přístupný při případných opravách.

Tento zdroj lze v budoucnu využít ve výuce, kde v použití s kulovým integrátorem bude možné vytvořit laboratorní úlohu. V této úloze by mohli studenti názorně vidět skládání barev, změnu spektrálních veličin se stmíváním a sami si vyzkoušet míchání bílého světla, např. o různých teplotách chromatičnosti, což lze využít při návrhu osvětlení měnícího se v závislosti na cirkadiánním rytmu.

Praktickým využitím zdroje byly zjištěny určité nedostatky. Při dlouhodobém provozu všech LED při vyšších napájecích proudech nad 650 mA, dochází k rychlému zahřívání. Je důležité měření přerušovat a hlídat konstantní teplotu, aby celé měření probíhalo za stejných podmínek.

Navrhované řešení:

- k hliníkovému chladiči na kterém jsou LED připevněny připevnit ze zadní strany větráček. Ten zajistí rychlejší výměnu vzduch v okolí chladiče a tím větší odvod tepla pomocí konvekce. Znamenalo by to úpravu zdroje pro napájení pomocného chlazení.
- Peltiérův modul – nutná úprava chladiče s LED, je třeba zajistit co největší plochu mezi diodami a peltiérovým článkem. Výhodou je možnost tvarového uzpůsobení chladič jednotky a hlavně možnost chladit na přesně nastavenou teplotu. Nevýhodou je proudová náročnost tohoto zařízení. Důležité podrobnější seznámení s problematikou.

Při měření bylo zapotřebí nastavit proudy jednotlivých LED na hodnoty nižší než 10 mA. Toto sestavený zdroj neumožňuje.

Navrhované řešení:

- výměna stávajících potenciometrů za potenciometry s vyšší nastavitelnou hodnotou odporu (např. 10 kΩ). Druhá možnost je do stávajícího regulačního rozsahu připínat předřadný odpor, čímž by se zvětšil rozsah regulace k nižším hodnotám proudu.

Teoretická část se zabývá naukou o světle, záření, optickým orgánem a dalšími tématy. Jsou zde uvedeny základní parametry LED, jejich vlastnosti při stmívání a teplotní závislost.

Ve čtvrté kapitole je popsán kulový integrátor, který je využíván v této práci jako měřicí přípravek a bude takřka vždy používán při měření LED ovládaných zdrojem vyrobeným v rámci této práce. Dále je v této kapitole popsán výběr LED, jejich základní parametry a závislosti na změně proudu.

V poslední kapitole jsou zpracovány naměřené hodnoty a vykresleny grafy změn světelného toku, měrného výkonu, a elektrického výkonu v závislosti na změně proudu (stmívání). Nejprve byly vybrané LED změřeny samostatně kdy nás zajímal posun souřadnic v trichromatickém trojúhelníku při stmívání, z těchto hodnot jsem sestrojil grafy. Ty jsou vloženy v měřítku do trichromatického trojúhelníku a jsou uvedeny v příloze. Dalším předmětem zájmu byla změna měrného výkonu při smívání.

## Seznam použité literatury

- [1] JIŘÍ, Habel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické, 1990. 75 s. ISBN 80-01-00407-4.
- [2] Sokanský K., a kolektiv, Racionalizace v osvětlování kancelářských, školských a bytových prostor. Česká společnost pro osvětlování regionální skupina Ostrava, Ostrava, 2004
- [3] Habel J., Základy světelné techniky (5), Světlo – časopis pro světelnou techniku a osvětlování. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40236.pdf>
- [4] Slovák F., Analýza parametrů světloemituujících diod. Dostupné z WWW: [http://dip.felk.cvut.cz/browse/pdfcache/slovaf1\\_2009dipl.pdf](http://dip.felk.cvut.cz/browse/pdfcache/slovaf1_2009dipl.pdf)
- [5] Melč A., Světelné zdroje pro interiéry aneb jak nahradit klasickou žárovku. Dostupné z WWW: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=38557](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38557)
- [6] Kolář P., Alikace svítivých diod v osvětlovací technice. Dostupné z WWW: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=26903](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26903)
- [7] Sokanský K., a kolektiv, Racionalizace v osvětlování kancelářských, školských a bytových prostor. Česká společnost pro osvětlování regionální skupina Ostrava, Ostrava, 2006
- [8] Sokanský K., a kolektiv, Racionalizace v osvětlování venkovních proctor. Česká společnost pro osvětlování regionální skupina Ostrava, Ostrava, 2005
- [9] Vanc R., Základy LED. Dostupné z WWW: <http://pandatron.cz/?605&led>
- [10] Šnek J., Posviťme si na LED. Dostupné z WWW: <http://www.azcasopis.cz/index.php/clanky/35-kat1/68-posvime-si-na-led>
- [11] DYBLE, M., et al.: *Lighting Research Center* [online]. 2005 [cit. 2011-03-27]. Impact of Dimming White LEDs: Chromaticity Shifts Due to Different Dimming Methods. Dostupné z WWW: <<http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/pdf/dyble-SPIE2005.pdf>>.
- [12] Richtr Z., Potenciál úspor vyplývající z použití moderních světelných zdrojů ve vnitřních pracovních prostorech. Ostrava, 2011
- [13] Wikipedie, Strída. Dostupné z WWW: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Strída\\_\(elektronika\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Strída_(elektronika))
- [14] Krejčík A., Zdroje proudu. 2002, ISBN 80-86056-84-8
- [15] Sedláček M., Řízení výkonové LED pomocí Attiny. Dostupné z WWW: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=30942&lang=0](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30942&lang=0)
- [16] Maňák J., Vybraná spektrofotometrická měření. Diplomová práce, Ostrava 2010

- [17] Cree [online]. Dostupné z WWW: <http://www.cree.com/led-components-and-modules/products>
- [18] SHEEHAN, G.: Facts about Dimming. *LED Professional Review* [online]. 2011, 23, 1, [cit. 2011-03-08]. Dostupný z WWW: [http://w3.lightbasedtechnologies.com/files/White\\_Papers/Facts\\_About\\_Dimming.pdf](http://w3.lightbasedtechnologies.com/files/White_Papers/Facts_About_Dimming.pdf).
- [19] MÁCHA, Marek. Miešanie LED svetelných zdrojov ako nástroj pre zvyšovanie Ra. *Svetlo*. 2011, 5, s. 62-63. ISSN 1212-0812.
- [20] GORDON, K.: *U. S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy* [online]. 2008 [cit. 2011-01-17]. Color Quality of White LEDs. Dostupné z WWW: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/color\\_quality\\_of\\_white\\_leds.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/color_quality_of_white_leds.pdf).
- [21] Cree [online]. 2010 [cit. 2010-12-30]. Cree XLamp XP-C LEDs. Dostupné z WWW: <http://www.cree.com/products/pdf/XLampXP-C.pdf>.
- .



## Seznam příloh:

Příloha A: Vyzážené spektrum bílé LED se čtyřmi čipy A5

Příloha B: Změna teploty chromatičnosti v závislosti na proudu

Příloha C: Trichromatický trojúhelník a spektrální charakteristika – výsledky podle Tab. 5.13

Příloha D: Trichromatický trojúhelník a spektrální charakteristika – výsledky podle Tab. 5.14

Příloha E: Trichromatický trojúhelník a spektrální charakteristika – výsledky podle Tab. 5.15

Příloha F: Trichromatický trojúhelník a spektrální charakteristika – výsledky podle Tab. 5.16

Příloha G: Posun trichromatických souřadnic bílé LED při regulaci proudu

Příloha H: Posun trichromatických souřadnic modré LED při regulaci proudu